

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Aufbruch ins Reich der Petaflops

Im Halbjahres-Takt schießt die Leistung von Computern in die Höhe – scheinbar grenzenlos. Schon beim Kauf ist die Kiste technisch veraltet. Wo mag das alles enden? Im Ernst: Wen macht es glücklicher, wenn die Schreibtischboliden Excel-Dateien im Gigahertz-Taumel exekutieren?

Beim wissenschaftlichen Rechnen ist eine wichtige Maßeinheit der „Flop“. In der Welt der Computer steht ein Flop nicht notwendigerweise für einen Reinfall, sondern für einen elementaren Rechenschritt. Die ersten Elektronenrechner der 1940er Jahre schafften mal eben einige Flop pro Sekunde, abgekürzt Flops. Heutige Supercomputer werden bereits nach ihren Teraflops taxiert, ihre Leistung also in Billionen Flops gemessen.

Der derzeitige Weltrekordhalter heißt „Earth Simulator“ und füllt in Japan eine ganze Turnhalle. Mit einem Rechentempo von 35 Teraflops untersuchen die Forscher vor allem Klima und Erdbeben, über eine Million Mal schneller als ein moderner Büro-PC. Grenzen haben die Erbauer vorläufig nicht zu spüren bekommen. Nach dem viel beschworenen Moore’schen Gesetz wird sich, so erwarten Experten, die Rechenkraft weiter alle zweieinhalb Jahre verdoppeln. Die erste Maschine, die dann in jeder Sekunde eine Million Milliarden Rechenschritte abwickelt – der Petaflops-Computer –, sollte demnach bis zum Jahr 2009 in Betrieb gehen.

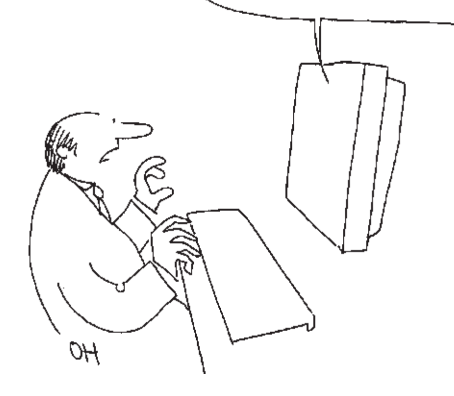
Auf dem Weg dorthin und darüber hinaus wird die Rechnertechnik physikalisches Neuland betreten: Die Technologie der Spintronik, die den Spin der Elektronen manipuliert und heute schon in Leseköpfen von Festplatten genutzt wird, ist vielleicht der entscheidende Schritt auf dem Weg zum Quantencomputer (Seite 28). Auch das Rechnen in ultraschnellen Netzwerken („Gridcomputing“) ist im Aufbau. Aber was machen wir mit all der Rechenpower? Wer braucht all die Tera-, Peta- oder Exaflops?

In der Wissenschaft: Numeriker bleiben unersättlich, so bekundeten sie kürzlich auf einer Tagung zum Höchstleistungsrechnen in Stuttgart. Ob Blutgefäße, Herzmuskel oder Biomechanik, ob turbulente Verbrennung, Grundwasserströmung, Alterung von Atombomben oder die Entwicklung des Universums: All diese Objekte oder Prozesse werden auch Petacomputer nicht zur Zufriedenheit simulieren.

Im Alltag: Vermutlich werden wir in einem Jahrzehnt vor Zig-Giga- oder Teraflop-PCs mit dem tausendfachen Speicherplatz heutiger Geräte sitzen. Solche Rechner mit 120-Terabyte-Festplatten eröffnen stolze Möglichkeiten: 120 Millionen Bücher fänden darauf Platz, alternativ 40 Millionen Lieder oder 30 000 Filme. Das pausenlose Abspielen so vieler Filme würde fast sieben Jahre dauern – und erst das Lesen all der Bücher …

Und wie kämen all die Daten in den Rechner? Entweder über 180 000 CD-Roms oder über Leitungen, die für solche Datengebirge zwanzig Jahre störungsfreien Betrieb benötigen würden. Von der Wünschbarkeit solcher Dinge einmal abgesehen: Wer könnte für sie bezahlen? Und wie ließen sich solche Datenmengen überhaupt verwalten?

Wie es scheint, wachsen hier PCs heran auf der Suche nach einem Bedarf. Einen solchen Fall erleben wir gerade im Mobilfunk: UMTS-Handys kommen nun auch in die Läden – mal sehen, ob sie einer braucht.



www.spektrum.de: Wir haben unseren Internet-Auftritt überarbeitet. Ab jetzt finden Sie ein „lebendes Inhaltsverzeichnis“ (mit laufender Aktualisierung), tägliche Neuigkeiten sowie Rubriken-„Sammelordner“ – zum schnellen Stöbern in allen Inhalten.

TITELBILD:

Ultraklein dank Spintronik: Während Elektronen durch die Mikrochips der Zukunft schwirren, dient die Orientierung ihres Eigendrehimpulses als elementare Informationseinheit.

Bild: Slim Films

TITELTHEMA: COMPUTERTECHNIK

Mit Spintronik auf dem Weg zum Quantencomputer

Seite 28

Die nächste Revolution der Computertechnik steht vor der Tür. Der Träger der elementaren Information ist so klein wie nie zuvor: der Spin eines einzelnen Elektrons. Es gilt, seine quantenmechanischen Eigenschaften nicht als unerwünschte Effekte zu eliminieren, sondern für ungeahnte Leistungen zu nutzen.



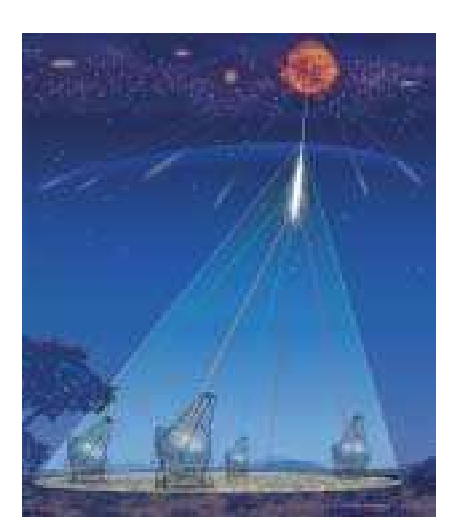


DIE LOMBORG-KONTROVERSE

„Alles wird besser“ – ganz von selbst?

Das behauptet jedenfalls der dänische Statistiker Björn Lomborg in einem breit angelegten Angriff auf die Warnungen der Umweltforscher. Drei Experten setzen sich zur Wehr.

Seite 36



HOCHENERGIE-ASTROPHYSIK

Der Kosmos im Gammalicht

Eine trickreiche Beobachtungstechnik ermöglicht es, die hochenergetische Gammastrahlung von Himmelsobjekten vom Erdboden aus zu erfassen und in Bilder dieser Quellen umzuwandeln. Damit wird der Astronomie ein neuartiges Fenster für Beobachtungen geöffnet.

Seite 48

KOMMUNIKATION

Das Festnetz der Bienen

Für ihren informativen Schwänzeltanz sind die Honigbienen berühmt. Der mitschwingende Tanzboden entpuppt sich nun als raffiniertes Medium für Kommunikationssignale, als eine Art Festnetz für Mitteilungen geschäftlicher Art bis hin zum Gefahrenalarm.

Seite 60



ESSAY

Die Mär vom Jungbrunnen

In einem öffentlichen Appell warnen namhafte amerikanische Alternsforscher vor den Angeboten der boomenden Anti-Aging-Industrie. Der natürliche Alterungsprozess läßt sich bisher nicht aufhalten.

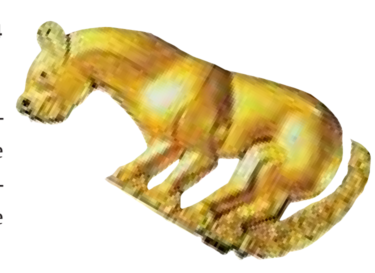
Seite 68



ARCHÄOLOGIE Seite 74

In Sibiriens Tal der Könige

Die Skythen, so berichtet der antike Historiker Herodot, seien vom Land der Gold hütenden Greife an die Küste des Schwarzen Meeres und weiter nach Medien gezogen. Archäologen suchen nun die Ursprünge dieser kriegerischen Nomaden im Herzen Sibiriens.



TECHNOSKOP-MAGAZIN: Seite 82

Mikroelektronik

Fertigbau mit Steigleitungen

Die Welt der Mikrochips ist bislang flach; das setzt der Geschwindigkeit Grenzen. Nun streben die Hersteller in die dritte Dimension und entwickeln Chip-Hochhäuser in Plattenbauweise.



Außerdem:

➤ Verdeckte Operationen: Infrarotmarker und Computer unterstützen Gesichtschirurgen

➤ Lasergewitter: Ein Mikroskop schaut Molekülen bei der Arbeit zu

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

„Forschungspolitik vor der Wahl, Teil I“



REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Die unheimliche Macht der Bilder

Rezensionen – April 2002

Abkanzelung der Trinitätslehre

Erstaunt war ich darüber, dass ein Autor sein Buch selbst anpreisen darf. Ich hatte das Buch wegen einer Rezension in der Süddeutschen Zeitung, die ihren eigenen Ressortleiter lobte, gekauft, da ich die Thematik interessant finde. Mittlerweile bin ich enttäuscht, denn es handelt sich um die geschickte Kompilation von Rezensionen, Artikeln usw. aus den Wissenschaftsfeuilletons der führenden Zeitungen und Zeitschriften. Als Naturwissenschaftler und Theologe habe ich mich besonders über die kenntnislose und ressentimentgeladene Abkanzelung der Trinitätslehre und der unbegriffenen theologischen Methoden geärgert, die man wenigstens verstanden haben sollte, wenn man sie ablehnt. Mittlerweile wundere ich mich über die Vermarktungsstrategie für dieses Buch nicht mehr. Es hat sie nötig.

Dr. Kuno Füssel, Andernach

Über das Woher, Wohin, Warum des Menschen

Es geht bei ernst zu nehmenden Theologen schon lange nicht mehr darum, ob ein Mythos oder eine mythische Redeweise im empirischen Sinn historisch Recht hat, sondern um die Frage, was an Grundsätzlichem über das Woher, Wohin und Warum des sich seiner selbst nicht gewissen, nachdenkenden Menschen ausgesagt wird. Ich habe den Eindruck, die jahrhundertelang mit ungeheurer Arroganz von der Kirche behauptete Überlegenheit ihrer Sichtweise ist strukturell auf eine bestimmte Art naturwissenschaftlichen Denkens übergegangen. Hier wäre vor aller erkenntnistheoretischen Diskussion der schlichte Sachirrtum zu korrigieren, dass das Handwerkszeug der Exegese seit 2000 Jahren gleich sei: Die Aufklärung und in ihrem Gefolge die historisch-kritische Methode haben den Paradigmenwechsel zur wissenschaftlichen Erforschung der Bibel und der vor ihrem Hintergrund entstandenen Glaubensaussagen bewirkt.

Der Verfasser sollte einfach seiner eigenen Einsicht folgen: „Voraussetzung für jeden wissenschaftlichen Fortschritt ist, dass man sich der Begrenztheit durch die Bilderwelt, in der man gefangen ist, bewusst wird, denn sonst kann aus einem wissenschaftlichen Welt-Bild Aberglauben werden.“ Wie wahr.

Frank Waterstraat, Rodenberg

Die Ursprache der Alteuropäer – Mai 2002

Basken, unsere Zeitgenossen und Verwandten

Die zentrale These dieses Titelthemas, dass alle Europäer Basken sind, ist nicht haltbar. Zwar ist Europa vermutlich vor ca. 12 000 Jahren, am Ende der letzten Eiszeit, von der iberischen Halbinsel aus besiedelt worden. Doch über die Sprache dieser Siedler ist nichts bekannt, und es muss keineswegs baskisch gewesen sein. Die baskische Sprache ist erst seit dem 16. Jahrhundert schriftlich niedergelegt. Ihre Entwicklung vor dieser Zeit entzieht sich der Forschung. Nicht zuletzt daran sind alle Versuche gescheitert, eine Verwandtschaft des Baskischen mit anderen Sprachen zu ermitteln. Über den Zustand des Baskischen – oder seine bloße Existenz – vor 12 000 Jahren weiß niemand etwas. Das Vorkommen von einzelnen Silben moderner baskischer Wörter in modernen mitteleuropäischen Ortsnamen beweist nichts.

Während der Eiszeit haben die Einwohner der spanischen Mittelmeer- und Atlantikküste sowie der des angrenzenden Südwestfrankreich die Magdalénien-Kultur entwickelt. Dabei ist noch unklar, ob sie aus dem Norden oder dem Süden nach Spanien einwanderten. Die heutigen Basken stammen, ebenso wie andere Europäer, unter anderem von diesen Menschen ab. Weitere Wanderungswellen haben das Baskenland seitdem kaum erreicht. Es ist aber unsinnig, deshalb die vorzeitlichen Bewohner Nordspaniens in kühnem Rückschluss als Basken bezeichnen zu wollen. Die Basken haben ebenso wie alle anderen Europäer 12000 Jahre Entwicklung hinter sich, seit frühe Menschen von der Iberischen Halbinsel aus Europa besiedelten. Basken sind Europäer wie wir auch, also unsere Zeitgenossen und Verwandten, nicht unsere entfernten Vorfahren.

Dr. Thomas Grüter, Münster



MICHEL PROUX UND HENRI BIDAULT

Die Vertreter der Magdalénien-Kultur trugen nach der Eiszeit ihre Sprache nach ganz Europa.

Einer Neubenennung entgangen

Dieser Aufsatz ist sehr informativ und zeigt, dass die Namengebung besonderer Lokalitäten schon früh vorgenommen wurde. Auch wenn andere Völkerschaften diese Räume in Besitz nahmen, ist doch der Name erhalten geblieben bzw. weitergegeben worden.

Ich möchte auf einige Beispiele von Gewässernamen in Österreich hinweisen, die die Silben „Ur“, „Sal-/Salm“, „Al-/Alm“ und „Is“ tragen. Es sind dies die Flüsse Mur, Mürz, Urslau, Alm, Lammer, Ill, Iller, Erlauf, Salza, Salzach, Saalach, Sölk, Isel, Loisach, Liesing. Alle liegen im Zentralalpen- und nördlichen Voralpengebiet und sind einer Neubenennung durch eine slawische Besiedlung entgangen. Umgekehrt kann man von einer kontinuierlichen Besiedlung seit der Hallstattzeit und früher ausgehen.

Ganz besonders möchte ich auf die in der Antike von Herodot bis in römische Zeit verwendete Benennung des Oberlaufes der Donau mit „Ister“ oder auch „Hister“ hinweisen. Der Name Danubius wurde in römischer Zeit üblicherweise erst für den Flussabschnitt Rumänien – die Provinzen Dacien und Mösien – verwendet. Auf diesen alten Namen der Donau geht der Name „Österreich“ zurück. Dieser wurde vor mehr als tausend Jahren in einer Schenkungsurkunde erstmalig als „Ostarichi“ verwendet, was soviel bedeutet wie „Land an der Ister“. Der Name Austria hat damit nichts zu tun, Austria heiß wieder soviel wie Ostreich, was auch für die damaligen Herrschaftsverhältnisse zutrifft.

Dipl.-Ing. Wolfgang Fischer, Pitten, Österreich

Wie der Mensch das Denken lernte – April 2002

Arbeitsteilige Gruppen als Einheiten der Evolution

Das Denken findet im Hirn statt. Das Wachstum des Hirns ist die markanteste evolutionäre Entwicklung bei der Menschwerdung. Es muss also ein sehr starker selektiver Druck bestanden haben, um das große Hirn hervorzubringen.

Die Aussage von Ian Tattersall, das Auftreten höherer geistiger Fähigkeiten sei das plötzliche Nutzbarmachen eines brachliegenden Potenzials, erscheint angesichts der rasanten Entwicklung des Hirnvolumens in den letzten vier Millionen Jahren alles andere als plausibel. Als Erklärung hierfür müssen wir eine im Hirn stattfindende Leistung annehmen, die eine verbesserte Reproduktion bewirkt hat. Worum kann es sich gehandelt haben?

Mit großer Wahrscheinlichkeit war dies die Fähigkeit, arbeitsteilige Gruppen zu bilden. Dies schließt die Fähigkeit ein, viele Individuen und deren Position in der Hierarchie zu kennen, diese Hierarchie abseits individueller Interessen als ordnendes Prinzip der Gruppe zu akzeptieren, und schließlich die Gruppe in Konkurrenz zu anderen Gruppen aktiv, auch im Kampf, zu unterstützen. Die größere und besser organisierte Gruppe war der Konkurrenz überlegen. Bei der Entwicklung von uns Menschen müssen die Gruppen die Einheiten der Evolution gewesen sein, was bei den Individuen im gruppendienlichen Verhalten ihren Niederschlag gefunden hat. Die hierzu notwendige intellektuelle Leistung erbrachte das große Hirn.

In der überlegenen, fortschrittlichen Gruppe entstand das Kommunikationsbedürfnis, und parallel dazu das Mittel, nämlich die Sprache, um dieses Bedürnis zu befriedigen.

Paul Morsbach, Berg

Erratum

Steht das Erdmagnetfeld vor der Umkehr?

Spektrogramm – Juni 2002

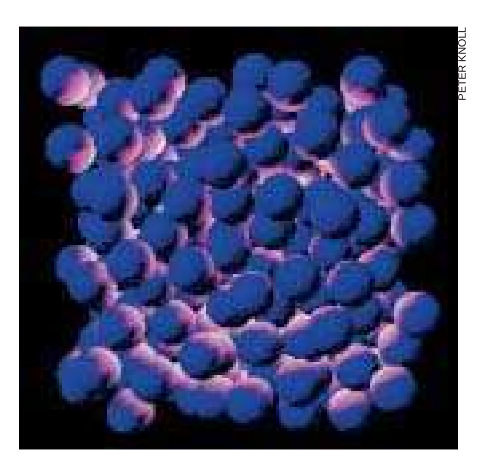
Es hätte richtig heißen müssen: „Ursache des Erdmagnetfeldes sind Konvektionsströme flüssigen Eisens im äußeren Erdkern, der im Wesentlichen aus flüssigem Eisen besteht.“

Die Redaktion

VRML: die verschmähte virtuelle Welt

Wissenschaft im Internet – April 2002

Mit Interesse haben wir den Artikel „VRML: die verschmähte virtuelle Welt“ gelesen. Wir verwenden zur Visualisierung unserer numerischen Simulationen allerdings Java3D, das auf denselben Prinzipien wie VRML aufbaut. Der Vorteil von Java3D liegt jedoch darin, dass man es weitaus flexibler als VRML einsetzen kann. Während man mit VRML hauptsächlich die Resultate von Simulationen betrachtet, kann man mit Java3D die Simulation direkt beobachten und damit oft ein besseres Verständnis erreichen. Schon seit einiger Zeit verwenden wir deshalb Java3D anstelle VRML zur Visualisierung unserer Molekular-Dynamik-Simulationen.



PETER KNOLL

Momentaufnahme einer Molekular-Dynamik-Simulation des Edelgases Argon mit Java3D

Peter Knoll, Siroos Mirzaei, Wien



Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Werner Gans und Andrea Jungbauer.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16–18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält eine Beilage von Weltbild Verlag, Augsburg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

PHYSIK

Neutronen für Europa

Auf einer internationalen Tagung im Alten Bundeshaus in Bonn wurde im Mai ein neues Projekt der europäischen Forschung mit Neutronen vorgestellt: die geplante Spallationsquelle ESS. Sie soll die leistungsfähigste Neutronenquelle der Welt werden.

Von Georg Wolschin

Neutronen bilden zusammen mit den positiv geladenen, nur geringfügig leichteren Protonen die Bausteine aller Atomkerne. Gebunden sind sie stabil und ermöglichen so den Aufbau unserer materiellen Welt. Als freie Teilchen zerfallen sie dagegen mit einer Halbwertszeit von 10,2 Minuten. Gemäß dem Welle-Teilchen-Dualismus der Quantenmechanik bilden sie Materiewellen mit einer Wellenlänge, die von ihrer Geschwindigkeit abhängt. Bei „thermischen“ Neutronen, die sich nur so schnell bewegen wie die Atome der umgebenden Materie, liegt die Wellenlänge zwischen 0,1 und 0,4 Nanometern, also im Bereich der Atomabstände in Festkörpern. Entsprechend feine Details lassen sich mit ihnen abbilden. Sichtbares Licht mit seiner sehr viel größeren Wellenlänge von 400 bis 800 Nanometern ermöglicht dagegen nur eine deutlich schlechtere Auflösung.

Ultraviolett-Laser arbeiten heute im Bereich von etwa 100 Nanometern (siehe „Licht mit Zukunft“, Spektrum der Wissenschaft 4/2002, S. 17); erst Röntgenstrahlung lässt jedoch eine mit Neutronen vergleichbare Auflösung zu. In den für die Zukunft geplanten Quellen – insbesondere Tesla – wird sie sogar als Laserlicht verfügbar sein.

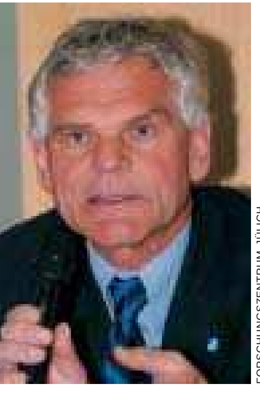
Beim Durchqueren von Materie werden den Neutronen im Wesentlichen von den Atomkernen gestreut. Da sie ungeladen sind, dringen sie tief in Festkörper ein. Deshalb erlauben sie, deren innere Struktur sehr genau zu untersuchen. Dabei erkennen sie sogar unterschiedliche Isotope eines Elements; denn deren Streukraft für Neutronen ist verschieden, obwohl sie sich chemisch gleich verhalten. Röntgenstrahlung, die zwar auch Wellenlängen unter 1 Nanometer hat, aber von den Elektronen der Atome gebeugt wird, kann das nicht. Außerdem ist sie für die sehr leichten Wasserstoffatome praktisch blind. Neutronen werden dagegen auch an ihnen stark gebeugt und verraten so ihre Position. Das ist vor allem für die

INTERVIEW

Meilenstein für die Neutronenforschung

Dieter Richter und Richard Wagner vom Forschungszentrum Jülich äußern sich zu den Perspektiven der Neutronenforschung mit der geplanten Europäischen Spallationsquelle ESS.





FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Dieter Richter (links) ist Direktor am Institut für Festkörperforschung, Richard Wagner im Vorstand des Forschungzentrums zuständig für die ESS.

Spektrum der Wissenschaft: *Wie wird bei der geplanten Europäischen Spallationsquelle für Neutronen ESS die relative Bedeutung der Forschungsgebiete aussehen – Biologie, Physik, Chemie, Materialwissenschaften?*

Dieter Richter: Eine solche Vorhersage ist nicht ganz leicht zu machen. Am Institut Laue-Langevin in Grenoble, das die derzeit stärkste Neutronenquelle hat, verteilt sich die Nutzung auf etwa 10 Prozent Biologie mit wachsender Tendenz, 35 Prozent Physik und 20 Prozent Materialwissenschaften; der Rest geht in die Ingenieurs- und Geowissenschaften sowie die Chemie. Berücksichtigt man auf europäischer Ebene alle bereits bestehenden Neutronenquellen, auch die schwächeren, ist beispielsweise die Biologie nicht so stark vertreten, weil sich biologische Fragestellungen mit den heutigen Quellen noch nicht so gut untersuchen lassen. Bei der ESS werden sich sicher komplexe Forschungsbereiche entwickeln, die man heute noch nicht angehen kann.

Spektrum: *Welches sind die interessantesten Fragestellungen der Grundlagenforschung mit Neutronen?*

Richter: Wenn wir mit der Festkörperphysik anfangen, geht es dort heute beispielsweise um so genannte Quanten-Phasenübergänge, also Übergänge, die durch quantenmechanische Fluktuationen bewirkt werden: ein sehr abstraktes Gebiet, aber Sie haben mich ja nach Grundlagen gefragt. In der Chemie will man unter anderem den Ablauf von Reaktionen verstehen, in der Biologie ausgewählte Wasserstoff-Positionen in den aktiven Zentren von Enzymen finden, was für die Entwicklung von Arzneimitteln große Bedeutung hat. Geowissenschaftler sind daran interessiert, das dynamische und thermodynamische Verhalten von Magmen und Mineralien unter den Drücken und Temperaturen des Erdmantels zu erforschen; sie stoßen dabei heute an Grenzen, die sie mit der ESS zu überwinden hoffen.

Richard Wagner: In den Materialwissenschaften möchte man diffusionskontrollierte Phasenübergänge in Echtzeit verfolgen, um zum Beispiel etwas über das Verhalten von Mikrostrukturen, die die Eigenschaften von Werkstoffen kontrollieren, unter äußeren Einflüssen wie hohen Temperaturen oder mechanischen Spannungen zu lernen. Ingenieurswissenschaftler wollen Eigenspannungs-Gradienten in sehr kleinen Volumina untersuchen. Daraus erhalten sie unter anderem Informationen über Schädigungs- und Versagensmechanismen in lasttragenden und rotierenden Bauteilen. Für beides reichen die heutigen Neutronenintensitäten nicht aus. In der Nanotechnologie brauchen wir eine immer bessere räumliche Auflösung. Auch dies verlangt eine hellere Neutronenquelle.

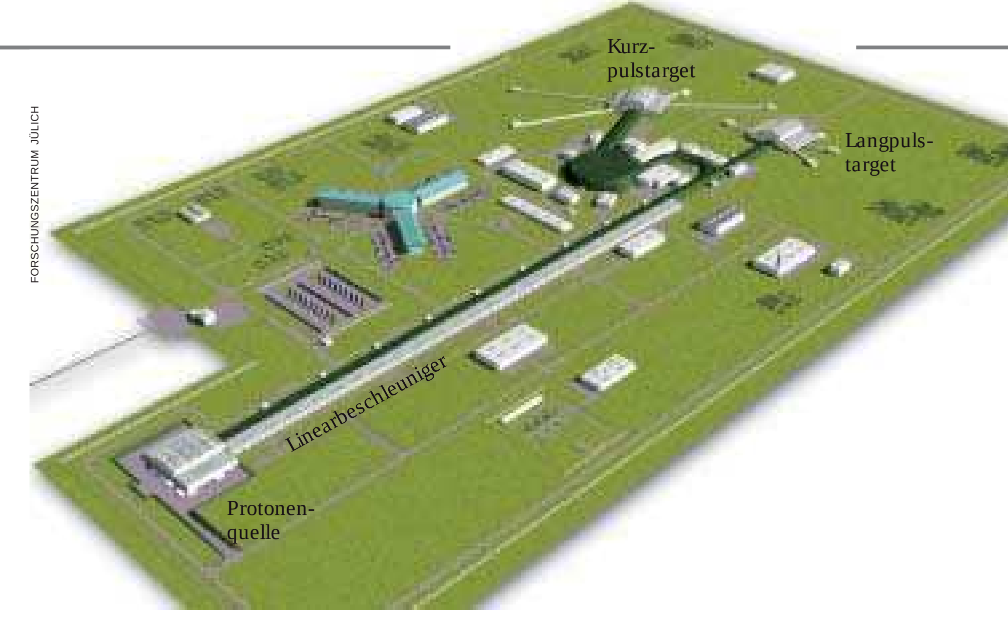
Spektrum: *Eine Spallationsquelle liefert gepulste Neutronenstrahlung. Was für Vorteile bringt sie gegenüber der kontinuierlichen Strahlung aus Forschungsreaktoren?*

Untersuchung biologischer Proben, die Wasserstoff an entscheidenden Positionen enthalten, sehr wichtig.

Schließlich lassen sich atomare und molekulare Bewegungen detailliert analysieren, indem man die Energieänderung der Neutronen bei der Streuung misst. So gelingt es beispielsweise, die Schwingungsenergie eines Kristalls zu ermitteln, was Hinweise auf dessen Wärme- und Stromleitungseigenschaften gibt.

Angesichts all dieser Vorteile hat sich die Neutronenforschung zu einem wichtigen, rasant expandierenden Wissenschaftszweig entwickelt, der die Forschung mit Röntgenphotonen in vieler Hinsicht ergänzt. Die benötigten Neutronen werden dabei entweder in „Spallationsquellen“ durch Beschuss eines Targets mit einem energiereichen Protonenstrahl oder in Forschungsreaktoren durch Kernspaltung erzeugt.

Zum zweiten Typ gehört die stärkste Neutronenquelle in Europa: der Höchstfluss-Reaktor am Institut Laue-Lange-



Die Spallationsquelle ESS, hier in einer Projektskizze, soll das Mekka der europäischen Neutronenforschung werden. In einem Linearbeschleuniger auf hohe Geschwindigkeiten gebrachte Protonen treffen in zwei Targetstationen auf schwere Atomkerne und erzeugen dabei Neutronen. Diese werden in vierzig (hier teilweise eingezeichneten) Strahlrohren für Experimente in Physik, Chemie, Biologie und Materialwissenschaften genutzt. Um den Standort bewerben sich bisher Schweden, England und Deutschland.

Richter: Zunächst gibt es wohl fast nichts, was man mit gepulsten Neutronen nicht besser machen kann als mit kontinuierlichen. Das liegt daran, dass im hellen Blitz der gepulsten Strahlung Neutronen fast aller Wellenlängen versammelt sind und sich über ihre unterschiedliche Flugzeit zum Detektor trennen lassen, sodass die gesamte Intensität nutzbar ist. Beim kontinuierlichen Strahl müssen Sie dagegen in der Regel eine Wellenlänge auswählen und den ganzen Rest wegwerfen.

Wagner: Auch bei Reaktoren lässt sich der Strahl zwar mechanisch zerhacken. Dabei gehen jedoch etwa 99 Prozent der Intensität verloren.

Spektrum: *Weltweit sind bereits einige Spallationsquellen in Betrieb – so Isis am Rutherford-Laboratorium in England – und einige im Bau – wie SNS im amerikanischen Oak Ridge. Außerdem gibt es viele laufende Forschungsreaktoren wie den Höchstflussreaktor am ILL. Wird eine weitere große Einrichtung wie ESS da überhaupt gebraucht?*

Richter: In Europa haben wir etwa vier- bis fünftausend Neutronennutzer. Doch deren Anzahl ist im Wesentlichen durch das Angebot beschränkt. Sie wird schon allein dadurch steigen, dass die gepulste Strahlung von ESS Experimente erlaubt, an die heute gar nicht zu denken ist, weil Intensität oder Auflösung dafür nicht ausreichen. Ich glaube deshalb, dass es keine Schwierigkeit geben wird, die ESS auszunutzen. Nehmen Sie das Beispiel England: Bevor Isis gebaut wurde, gab es dort einige hundert Neutronennutzer, danach hat sich deren Anzahl auf 1200 bis 1300 verdreifacht. Zudem ermöglicht die ESS eine neue Qualität von Experimenten, mit denen wir zu neuen Phänomenen und Substanzen vordringen können.

Spektrum: *Außer der ESS gibt es in Deutschland noch andere große Forschungsprojekte, die nach Möglichkeit weiterverfolgt werden sollen, so den Elektron-Positron-Collider Tesla bei Desy in Hamburg und ein Schwerionen-Synchrotron bei der GSI in Darmstadt. Nach Aussage des BMBF können wohl nicht alle drei Projekte realisiert werden. Wie beurteilen Sie bei dieser Konkurrenz die Aussichten der ESS?*

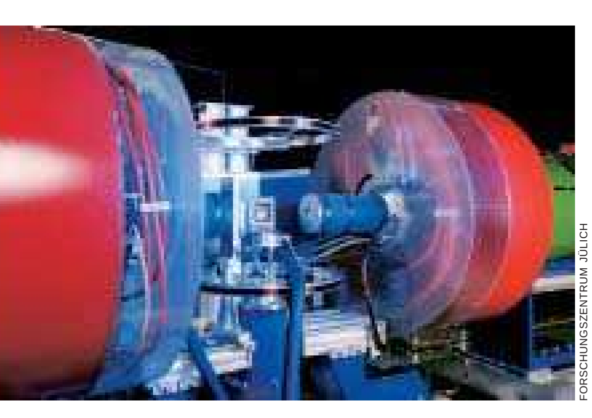
Wagner: Die ESS ist ja ein gesamteuropäisches Projekt, für das derzeit fünf Standorte diskutiert werden – je zwei in Deutschland und England sowie einer in Schweden. Es wäre schön, die Anlage nach Deutschland – und hier speziell Jülich – zu bekommen. Letztendlich wird es aber eine wissenschafts- und forschungspolitische Entscheidung sein, welche der genannten Großgeräte hier zu Lande realisiert werden sollen. Auch die Amerikaner bemühen sich um eine Tesla-ähnliche Anlage und in Japan wird eine Hadronen-Facility gebaut, die teilweise Experimente mit abdeckt, wie sie an der GSI vorgesehen sind. Insofern sollte bei der Entscheidung die globale Situation berücksichtigt werden.

Spektrum: *Inwiefern ergänzen sich die Forschungen mit Neutronen- und mit Röntgenquellen aus Beschleunigern?*

Richter: Neutronen haben eine ganze Reihe von Vorteilen gegenüber den heute vorwiegend genutzten Röntgenphotonen, die sie nur deshalb nicht voll ausspielen können, weil es nicht genug Neutronen gibt. Neutronen sehen alle Atome – leichte wie Wasserstoff und schwere – mehr oder weniger gleich gut. Das ermöglicht etwa in der Biologie die Beobachtung der Wasserstoffatome. Neutronen spüren den Magnetismus – die Bestimmung magnetischer Strukturen mit Röntgenstrahlen ist dagegen sehr schwierig und nur indirekt möglich. Außerdem kann man mit Neutronen nicht nur die Positionen, sondern auch die Bewegungen der Atome ermitteln.

Wagner: Die Strukturbestimmung von Proteinen wird heute fast ausschließlich mit Synchrotronstrahlung bei tiefen Temperaturen gemacht. Das setzt aber voraus, dass Sie die Proteine kristallisieren können, was nur bei rund 70 Prozent von ihnen möglich ist. Mit Neutronen kann man die Struktur von Eiweißstoffen unter physiologischen Bedingungen aufklären; außerdem lässt sich die Position von Wassermolekülen und Wasserstoffatomen bestimmen, die für die Funktion der Proteine wichtig sind – ein unschätzbarer Vorteil für die Biologie, Pharmaforschung und Medizin. Solche Untersuchungen verlangen jedoch häufig eine hohe Neutronenintensität, wie sie erst die ESS bieten wird.

Das Interview führte ***Georg Wolschin***.



Mit diesem Neutronen-Spin-Echo-Spektrometer lassen sich minimale Geschwindigkeitsänderungen von Neutronen beim Auftreffen auf eine Probe messen. Dies macht auch sehr langsame Molekülbewegungen im untersuchten Objekt sichtbar. So erfährt man etwa, was einem Autoreifen Straßenhaftung gibt.

vin (ILL) in Grenoble. Der Neutronenfluss ist dort doppelt so hoch wie bei der einzigen vergleichbaren deutschen Neutronenquelle, die allerdings, obwohl weitgehend fertiggestellt, noch immer auf die Betriebsgenehmigung wartet: der Münchner Forschungsreaktor FRM-II.

Die Anlage soll kontinuierliche thermische Neutronen liefern und zunächst mit Brennelementen auf der Basis von hochangereichertem Uran-235 betrieben werden. Da dieser Brennstoff internationalen Bestrebungen zuwiderläuft, die Verbreitung von kernwaffenfähigem Material einzudämmen, stößt sie auf politischen Widerstand. Deshalb ist eine spätere Umrüstung auf Brennelemente aus niedriger angereichertem, nicht waffenfähigem Uran vorgesehen. Das würde Brennelementgröße und thermische Leistung nicht ändern, den Neutronenfluss aber etwas reduzieren und die „Nutzungsqualität" entsprechend mindern.

Weltweit leistungsfähigste Anlage

Spallationsquellen werfen keine Proliferations- und nur marginale Radioaktivitäts- und Sicherheitsprobleme auf; denn sie beruhen auf einem völlig anderen physikalischen Prinzip. Hier wird ein Protonenstrahl in einem Beschleuniger auf hohe Energien gebracht und auf ein Blei- oder Quecksilbertarget geschossen. Die getroffenen Kerne senden dann die gewünschten Neutronen aus. Basis der europäischen Neutronenforschung an Spallationsquellen sind derzeit die gepulste Quelle Isis am Rutherford Appleton Laboratory mit einem Protonenstrahl von 156 Kilowatt Leistung und die weltweit stärkste – allerdings koninuierliche – Spallationsquelle SINQ am Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz, deren Strahlleistung 1 Megawatt beträgt. In Amerika ist SNS (Qak Ridge, 1 Megawatt) und in Japan eine vergleichbare Quelle (Tokai, 1 Megawatt) im Bau.

Die geplante Europäische Spallationsquelle ESS (*European Spallation Source*) mit zweimal 5 Megawatt Strahlleistung soll die weltweit leistungsfähigste Anlage werden; sie wird eine dreißigfach höhere Spitzenintensität haben als Isis. Vorgesehen ist ein Protonen-Linearbeschleuniger mit 1,3 Milliarden Elektronenvolt Einschussenergie, der an zwei Targetstationen Neutronen mit unterschiedlicher Zeitstruktur und verschiedenen spektralen Eigenschaften erzeugt, die dann für die Forschung an vierzig Instrumenten zur Verfügung stehen. Die zeitgemittelte Neutronenintensität wird die des Höchstfluss-Reaktors am ILL um zwei Größenordnungen übertreffen.

Über den Bau und den Standort in Europa – derzeit sind fünf Standorte in der Diskussion, darunter Lund, Leipzig und Jülich – soll bis 2004 entschieden werden, die Inbetriebnahme ist für 2010 geplant. Zu den Perspektiven des Projekts äußern sich der wissenschaftliche Koordinator Dieter Richter und Richard Wagner, für ESS zuständiges Vorstandsmitglied am Forschungszentrum Jülich, in einem Interview auf Seite 12. ■

Georg Wolschin *ist theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

SCHLAFREGULATION

Hitzeschock rettet übermüdete Fliegen

Wie unser Körper dafür sorgt, dass wir langfristig eine bestimmte Schlafmenge bekommen, ist noch völlig unklar. Bei Taufliegen zeigte sich nun ein verblüffender Zusammenhang zwischen Schlafregulation und Hitzeschockantwort.

Von Michael Groß

Können oder müssen Fliegen eigentlich schlafen? Oder ruhen sie sich lediglich aus, wenn sie regungslos dasitzen? Obwohl die Taufliege *Drosophila* seit Jahrzehnten der Erforschung der biologischen Uhr dient, konnte diese simple Frage überraschenderweise erst vor zwei Jahren schlüssig beantwortet werden: Ja, Taufliegen schlafen ebenso wie Sie und ich und Nachbars Dackel. Und wie bei Wirbeltieren wird ihr Schlaf von zwei unabhängigen Mechanismen reguliert: der inneren Uhr, welche die Schlaf-Wach-Folge mit der Tageszeit synchronisiert, und einem so genannten Homöostaten, der darauf achtet, dass die Schlafmenge im langfristigen Mittel konstant bleibt.

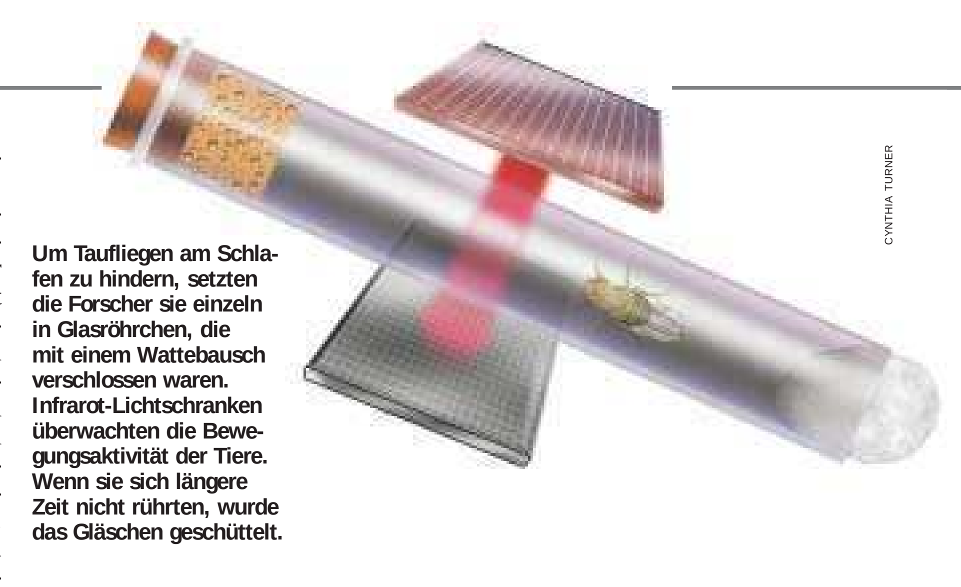
Während die biologische Uhr der Fliegen und einiger anderer Organismen recht gut untersucht ist, liegt die Regulierung der Schlafmenge – bei den Insekten ebenso wie beim Menschen – noch weitgehend im Dunkeln. Nun haben Untersuchungen an *Drosophila*-Mutanten die ersten Hinweise auf die molekularen Grundlagen des Homöostaten erbracht (*Nature, Bd. 417, S. 287*).

Paul Shaw und seine Kollegen am Neurosciences Institute im kalifornischen San Diego machten sich dabei die umfassenden Kenntnisse über die circadianen Rhythmen der Taufliege zunutze. Sie untersuchten eine ganze Reihe von mutierten Stämmen, bei denen jeweils eines der Gene der inneren Uhr beeinträchtigt oder ausgeschaltet war, und verglichen sie mit anderen Stämmen, deren Mutation sich nicht auf den Schlaf-Wach-Zyklus auswirkte. All diese Tiere traktierten die Forscher mit systematischem Schlafentzug über drei bis zwölf Stunden. Dazu schüttelten sie die Röhren, in denen jeweils eine Fliege zur automatischen Registrierung ihrer Bewegungen eingesperrt war, sobald das Insekt sich ruhig verhielt.

Taufliegen mit defekten Uhrgenen, die in völliger Dunkelheit gehalten werden, schlafen etwa zwanzig Minuten pro Stunde. Hindert man sie einige Stunden lang am Schlaf, so gleichen sie den Entzug anschließend je nach Art ihrer Mutation ganz oder teilweise – zu dreißig bis vierzig Prozent – aus und kehren dann zur gewohnten Schlafmenge zurück. Auf den Menschen übertragen, würde dies etwa einem dreitägigen Schlafentzug ent- ▶

sprechen, den man mit acht Stunden zusätzlichem Schlummer kompensiert.

Einer der mutierten Stämme fiel jedoch völlig aus dem Rahmen. Es handelte sich um die einzige Variante in dieser Studie, bei der der Biorhythmus komplett ausgeschaltet war. Die weiblichen Fliegen dieses Stamms namens cyc[01] holten nicht nur die während der sechsstündigen Wachphase verpassten zwei Stunden Schlaf vollständig nach, sondern holten sich das Entgangene gleich dreifach zurück, schliefen also sechs Stunden zusätzlich zu ihrem normalen Pensum. Auch danach kehrten sie nicht etwa zu ihrer ursprünglichen Schlafmenge zurück, sondern pendelten sich auf einen neuen Richtwert ein, der um rund fünfzig Prozent über dem alten lag. Auf den Menschen übertragen, wäre das so, als ob jemand nach sechs Tagen ohne Schlaf den Rest seines Lebens zwölf statt acht Stunden täglich in Morpheus' Armen ruhte. Nach einem zweiten Schlafentzug reagierten die Fliegen genauso, was im Endeffekt dazu führte, dass sie statt einem Drittel drei Viertel ihrer Zeit schlummernd verbrachten.



CYNTHIA TURNER

Um Taufliegen am Schlafen zu hindern, setzten die Forscher sie einzeln in Glasröhrchen, die mit einem Wattebausch verschlossen waren. Infrarot-Lichtschranken überwachten die Bewegungsaktivität der Tiere. Wenn sie sich längere Zeit nicht rührten, wurde das Gläschen geschüttelt.

Tödlicher Schlafentzug

Noch längerer Schlafentzug war für sie sogar lebensbedrohlich. Das galt nicht nur für die Weibchen, sondern auch für die Männchen, die ansonsten keinen Hang zur Überkompensation zeigten. Nach zwölf Stunden erzwungener Wachheit starb etwa ein Drittel der cyc[01]-Fliegen, von allen anderen Mutanten hingegen keine einzige. Mit diversen Kontrollexperimenten wiesen die Forscher nach, dass es sich bei dieser ungewöhnlichen Sterblichkeit nicht um eine allgemeine Stressfolge handelte: Der cyc[01]-Stamm verträgt übliche Belastungen mindestens genauso gut wie normale Taufliegen.

Auf der Suche nach einer Erklärung für die besondere Empfindlichkeit dieser Mutante untersuchten Shaw und seine Kollegen auch, ob sich der Schlafentzug auf die Produktion von Stressproteinen auswirkte – darunter die wohlbekannten Hitzeschockproteine, die zum Schutz gegen die schädlichen Folgen einer Überwärmung gebildet werden. Dabei erlebten die Forscher eine weitere Überraschung: Während bei allen anderen Fliegen die Herstellung der Stressproteine konstant blieb oder sogar leicht zunahm, ging sie bei der cyc[01]-Mutante zurück.

War dieses Absinken die Ursache der hohen Sterblichkeit? Um das zu prüfen, verpassten die Forscher den Fliegen vor dem Schlafentzug einen Hitzeschock, der die Produktion der Schutzproteine vorsorglich ankurbelte. Tatsächlich verringerte sich dadurch die Todesrate deutlich. Dieses Ergebnis war in höchstem Maße verblüffend. Offenbar existiert ein Zusammenhang zwischen zwei so grundverschiedenen Phänomenen wie der Hitzeschockreaktion und der Regulierung der Schlafmenge.

Worin diese Verbindung besteht, konnten die Forscher zwar noch nicht ergründen. Doch lieferten sie einen weiteren Beleg dafür. Dabei gingen sie von einer nahe liegenden Überlegung aus: Wenn Fliegen mit völlig ausgeschalteter biologischer Uhr nach langem Schlafentzug sterben, weil sie weniger Hitzeschutzprotein bilden, dann sollten Mutanten mit defekten Hitzeschockgenen ebenso empfindlich auf ein größeres Schlafdefizit reagieren. Tatsächlich bestätigte sich diese Vermutung bei einem Stamm, bei dem das Protein Hsp83 ausgeschaltet ist.

Damit kennt man jetzt bei *Drosophila* zwei Eiweißstoffe, die irgendwie an der Steuerung der Schlafmenge beteiligt sind. Sie haben, wie sich zeigte, Gegenstücke bei den Wirbeltieren. Und von diesen weiß man inzwischen, dass sie miteinander wechselwirken. Nachdem die Forscher bei der Regulation der Schlafmenge bisher völlig im Dunkel tappten, haben sie nun also offenbar einen Zipfel von der Lösung des Rätsels zu fassen bekommen, an dem sie sich weiterhangeln können. ■

Michael Groß *ist Biochemiker und Honorary Science Writer in Residence am Birkbeck College in London.*

URSPRUNG DES LEBENS

Die ersten Zellen – echt oder vorgetäuscht?

Unter Paläontologen ist ein heftiger Streit darüber entbrannt, ob es sich bei Einschlüssen in 3,5 Milliarden Jahre alten Gesteinen um die ältesten bekannten Lebensformen oder um bloße mineralische Strukturen handelt.

Von Henning Engeln

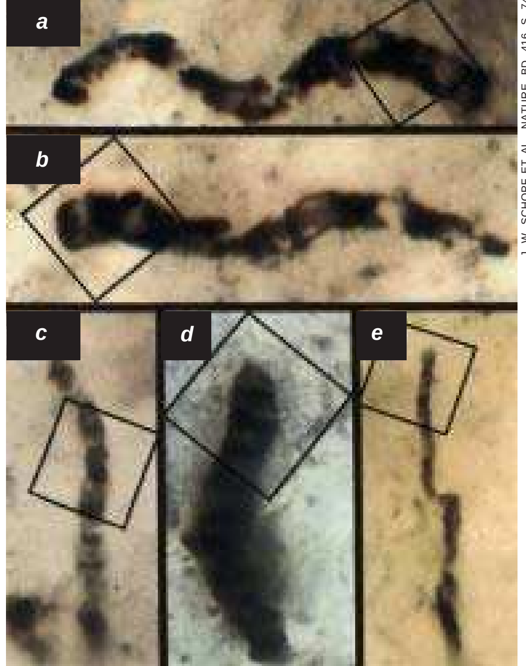
Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren hatte sich die Urerde aus einem Gemisch von Staubpartikeln und kleineren Materiebrocken zu einer glutflüssigen Kugel verdichtet. Doch noch über viele hundert Millionen Jahre wurde sie von umherschwirrenden Meteoriten bombardiert und aufgeheizt. Erst als sie vor rund 3,9 Millarden Jahren ihre Bahn quasi von solchen Geschossen leergefegt hatte, konnte sie genügend abkühlen, um teilweise zu erstarren und die ältesten heute noch erhaltenen Gesteine zu bilden.

Erstaunlich kurze Zeit danach aber musste bereits das Leben entstanden sein – zumindest nach bisheriger Lehrmeinung. Denn die frühesten geologischen Zeugnisse von Zellen wurden auf rund 3,5 Milliarden Jahre datiert. Und nicht nur das: Zu jener Zeit existierte offenbar bereits eine beachtliche biologische Vielfalt, die auf eine viele Jahrmillionen währende Vorgeschichte des Lebens schließen ließ. In den Gesteinsproben machten ▶

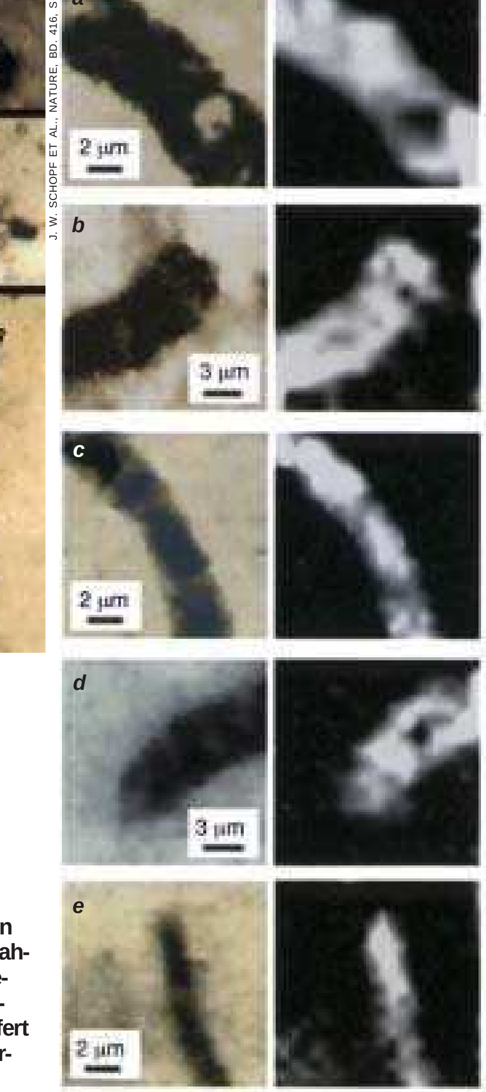
Paläontologen elf verschiedene Bakterien-Spezies aus, darunter Cyanobakterien (Blaualgen), die schon den hochkomplexen Vorgang der Photosynthese beherrschten, also Licht in chemische Energie umwandeln konnten.

Diese Erkenntnisse sind vor allem einem Mann zu verdanken: dem renommierten Geophysiker William Schopf von der Universität von Kalifornien in Los Angeles. 1993 hatte er in 3,465 Milliarden Jahre altem Quarzgestein aus dem „Chinaman's Creek" in Westaustralien, das unter dem Begriff „Apex chert" bekannt ist, jene zellartigen Einschlüsse entdeckt und als früheste Lebensspuren interpretiert. In einer jetzt in der Zeitschrift „Nature" veröffentlichten Arbeit schienen er und seine Mitarbeiter diese Sicht nun eindrucksvoll bestätigen zu können, indem sie mit Hilfe der Laser-Raman-Spektroskopie organisch gebildeten Kohlenstoff in den uralten australischen Proben aufspürten (Bilder rechts).

„Es besteht kein Zweifel daran, dass wir den biologischen Ursprung der ältesten bislang bekannten Fossilien beweisen konnten", freut sich Schopf daher. Seine Aussage hat indes einen Schönheitsfehler. Direkt auf seinen Nature-Artikel folgt eine Publikation seines Fachkollegen Martin D. Brasier von der Universität Oxford, der dieselben Fossilien begutachtet hat – und genau zum gegenteiligen Schluss kommt. Die Strukturen seien allesamt abiogenen Ursprungs und hätten sich in den Tiefen einer hydrothermalen Quelle aus amorphem Graphit gebildet, behaupten er und sein Team. Schopf habe den geologischen Kontext um die Mikrofossilien herum nicht genügend berücksichtigt und ihre Morphologie einseitig interpretiert, lautet der Vorwurf.



In fast 3,5 Milliarden Jahre altem Quarzgestein finden sich diese Strukturen, die William Schopf von der Universität von Kalifornien in Los Angeles als fossile Reste von Bakterien deutet. Die eingerahmten Ausschnitte sind rechts vergrößert gezeigt.



Lichtmikroskopischen Bildern von mutmaßlichen fossilen Bakterienresten (linke Reihe) sind Aufnahmen mittels Raman-Spektroskopie gegenübergestellt. Da das gemessene Raman-Streulicht charakteristisch für organischen Kohlenstoff ist, liefert es ein starkes Argument für den biologischen Ursprung der Strukturen im Quarzgestein.

Fossilien-Papst unter Beschuss

Diese Entwicklung entbehrt nicht einer gewissen Ironie, denn ausgerechnet William Schopf hatte immer wieder betont, wie schwierig der Nachweis früher Lebensformen sei, und war nicht zimperlich mit Kollegen umgesprungen. Harsch kritisierte er beispielsweise jene Nasa-Wissenschaftler, die 1996 verkündeten, außerirdische, bakterienähnliche Lebensformen in einem vom Mars stammenden Meteoriten nachgewiesen zu haben. Dieser in der Antarktis gefundene Himmelskörper mit der Bezeichnung ALH 84001 hatte sich anhand seiner chemischen Zusammensetzung als Brocken vom Mars identifizieren lassen und Carbonat-Ablagerungen aufgewiesen, deren längliche Struktur Bakterien verblüffend ähnelte. Doch Schopf monierte damals, die Strukturen seien hundertfach kleiner als irdische Mikroben und zeigten weder Zellwände noch Zeichen von Stoffwechsel, Vermehrung oder Koloniebildung.

Sollte ausgerechnet der „Papst" der frühen Fossilien – bislang unter Kollegen als äußerst sorgfältig bekannt – sich nun selbst geirrt haben? Es sind vor allem zwei Einwände, die Brasier und sein britisch-australisches Team vorbringen. Zum einen hätten sich dieselben morphologischen Strukturen, die Schopf und Mitarbeiter als Überbleibsel lebender Zellen deuten, bei näherem Hinsehen als überraschend vielfältig und uneinheitlich erwiesen; so erkenne man darunter auch Formen, die überhaupt nicht nach lebenden Zellen aussehen. Als Brasier und Kollegen die Schnitte der Fossilien unter dem Mikroskop in verschiedenen Schärfe-Ebenen betrachteten, machten sie an den zellähnlichen Strukturen ballonartige Ausbuchtungen, schlauchartige Verläufe, Verzweigungen und unscharfe Übergänge aus (Bild auf Seite 22).

Zum Zweiten ergab die neuerliche geologische Analyse der australischen Fundstelle, dass sich das dortige Urgestein nicht als Sediment im flachen Wasser abgelagert, sondern in einer heißen Quelle am Boden des Urozeans gebildet hatte. In einer metallhaltigen hydrothermalen Ader, möglicherweise unter dem Einfluss heißer vulkanischer Gase, hätte sich damals Kohlenstoff mit Mineralien zu jenen Strukturen verbunden, die vage an Bakterien erinnern – ohne Zutun irgendeines Lebewesens. Eines ist in jedem Fall klar: Wenn die Stelle damals tief unter Wasser am Meeresboden lag, dürften dort schwerlich Cyanobakterien gelebt haben, die auf Licht für die Photosynthese angewiesen waren. Der erste sichere Nachweis dieser fortgeschrittenen Einzeller stamme erst aus einer Zeit vor 2,7 Milliarden Jahren, betont Brasier daher.

Auch der Mikrobiologe Karl Otto Stetter von der Universität Regensburg, ein Spezialist für die bakterienähnlichen, ▶

urtümlichen Archaea (früher Archaebakterien genannt), zweifelt an der Existenz von Blaualgen vor 3,5 Milliarden Jahren: „Schopf folgert das aus der Morphologie der Fossilien, in der er Ähnlichkeiten zu heutigen Cyanobakterien sieht. Ich halte diesen Schluss aber für überzogen."

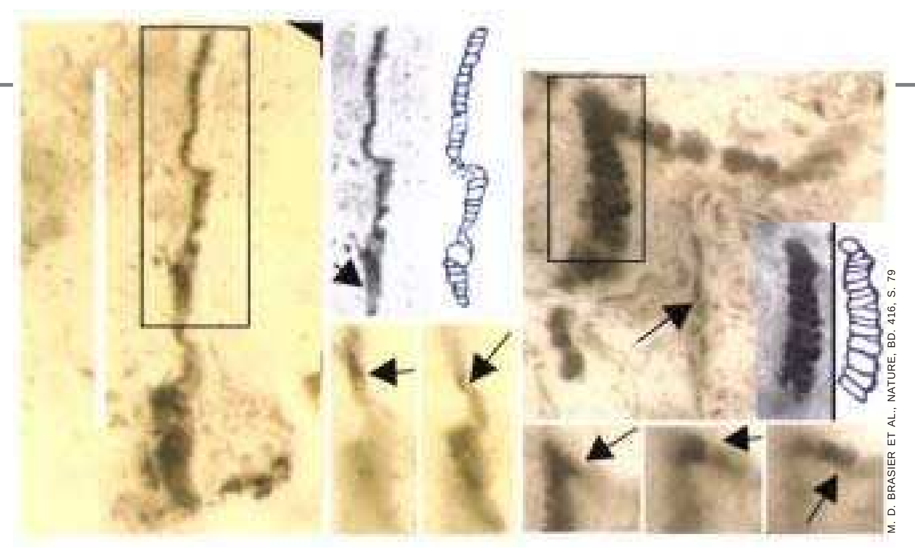
Inzwischen räumt der Gescholtene selbst ein, dass es sich bei seinen Fossilien womöglich nicht um Blaualgen handelt, und akzeptiert zugleich Brasiers Neuinterpretation der Fundstelle als hydrothermale Quelle. Er bleibt aber dabei, 3,5 Milliarden Jahre alte Lebensspuren nachgewiesen zu haben, und daran möchte auch Stetter trotz der Einwände von Brasier nicht grundsätzlich zweifeln.

Wladyslaw Altermann von der Universität München, der bei der Analyse der archaischen Fossilien mit Schopf zusammengearbeitet hat, hält die Kritikpunkte des britisch-australischen Teams im Wesentlichen für unbegründet. Ausufernde Formen und unscharfe Grenzen entlang der Einschlüsse seien nicht ungewöhnlich beim Vorgang der Fossilisierung, unter anderem weil sich zwischen Fossil und Quarz bevorzugt Eisenminerale bildeten. „Es ist ein Wunder, dass sich da überhaupt etwas erhalten hat", betont Altermann. Für ihn steht auch nicht fest, dass die Fossilien zeitgleich mit den hydrothermalen Quellen entstanden sind. Sie könnten sich ebenso gut erst einige Jahrmillionen später in Gesteinsporen oder an Bruchstellen abgelagert haben.

Duell der Argumente

Vor allem aber, glaubt Altermann, habe die neue Analyse mit der Raman-Spektroskopie Pluspunkte für Schopf gebracht. „Inzwischen ist es möglich, direkt in den Filamenten von Bakterien an fünf Mikrometer großen Stellen zu messen", erklärt der Geologe. Dabei habe sich herausgestellt, dass die Mikrofossilien eindeutig aus Kohlenstoffpartikeln bestehen und eine „organische Signatur" haben. Dies ergebe sich aus den Anteilen der Kohlenstoff-Isotope C-13 und C-12, die in der organischen Substanz von Lebewesen ein charakteristisches Verhältnis zueinander aufweisen. Genau dieses Verhältnis hat ein Mitarbeiter Schopfs an anderen präkambrischen Proben mittels Massenspektroskopie nachgewiesen.

Allerdings halten manche Kollegen einschließlich Brasier dieses Argument nicht für stichhaltig, da das Verhältnis der Kohlenstoff-Isotope auch durch Hitze während der Bildung von Mineralien beeinflusst werden könne – und damit kein hundertprozentiger Beweis für einen organischen Ursprung der Filamente sei. Davon ist Altermann jedoch überzeugt.



Was William Schopf in seinen Aufnahmen (schwarzweiß) als isolierte Fossilien deutete (Strichzeichnungen), erweist sich in neuen, konfokalen Bildern nur als Teil einer größeren Struktur. Die Pfeile zeigen auf die Übergänge zwischen den Motiven im Originalbild und den Fortsetzungen in höheren oder tieferen Brenn-Ebenen.

Er lässt den Einwand noch aus einem anderem Grund nicht gelten: „Wenn Brasier richtig liegen würde und die Strukturen abiogen entstünden, müsste man sie überall im Gestein finden. In Wirklichkeit sind sie jedoch extrem selten."

Noch ist das letzte Wort nicht gesprochen. Karl Otto Stetter resümiert: „Die Kontroverse zeigt vor allem, wie schwierig es ist, das Wenige, was aus jener frühen Zeit noch vorhanden ist, zu deuten."

Klarheit könnten neue Fossilien bringen, doch die sind äußerst rar. Bislang, betont Altermann, seien aus dem gesamten Archaikum – der Zeit vor mehr als 2,5 Milliarden Jahren – weniger als dreißig mikrofossile Arten aus grade mal fünf Gesteinsformationen weltweit bekannt. ■

Henning Engeln *ist promovierter Biologe und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Hamburg.*

ASTROPHYSIK

Sternleichen und die Entdeckung der Seltsamkeit

Massereiche Sterne kollabieren am Ende zu extrem dichten Objekten wie Neutronensternen oder Schwarzen Löchern. Nach neuesten Beobachtungen könnte es eine weitere Sorte superkompakter Sternleichen geben, die aus Quarkmaterie bestehen.

Von Markus Pössel

So solide die Festkörper erscheinen mögen, die uns im Alltag umgeben: In Wirklichkeit bestehen die Atome, aus denen sie aufgebaut sind, zum überwiegenden Teil aus leerem Raum; der Löwenanteil ihrer Masse ist im Zentrum konzentriert, dem winzigen Atomkern aus Protonen und Neutronen.

Dennoch sind Atome dank einer Kombination von Quanteneffekten und elektromagnetischer Wechselwirkung äußerst stabil. Mit den vergleichsweise geringen Kräften, die uns auf der Erde zu Gebote stehen, wäre es ein hoffnungsloses Unterfangen, sie zusammenpressen zu wollen. Erst der gewaltigen Eigengravitation, die auf Gebilde mit der Größe und Masse eines Mehrfachen der Sonne wirkt, gelingt es, Materie noch weiter zu komprimieren.

In den Anfangsphasen ihres Lebens sind Sterne allerdings Gebilde mit recht geringer Dichte. Sie bestehen aus leichten, gasförmigen Elementen wie Wasserstoff und Helium, aus deren Verschmelzung sie Energie beziehen. Diese Gase liegen vorwiegend als heißes Plasma vor, als strukturloses Gemisch aus Atomkernen und freien Elektronen. Für Stabilität sorgt ein Gleichgewicht widerstreitender Kräfte: Die Gravitation ist bestrebt, den Stern in sich zusammenfallen zu lassen; der innere Druck des Plasmas wirkt dem jedoch entgegen.

Was passiert, wenn der Kernbrennstoff aufgebraucht ist? Aus Sternen wie unserer Sonne, die nur eine relativ geringe Masse haben, werden dann so genannte Weiße Zwerge: äußerst dichte Gasbälle etwa von der Größe unserer Erde, aber weitaus höherer Masse, bei denen dieselben Quanteneffekte, die auch für die Stabilität von Atomen verantwortlich sind, der Schwerkraft die Waage halten.

Dramatischer ist das Schicksal von massereicheren Sternen: In einer Supernova-Explosion, bei der sie kurze Zeit so hell leuchten können wie eine ganze Galaxie, stoßen sie ihre äußere Hülle ab, während die Zentralregion in sich zusammenstürzt. In diesem Fall schaffen es die erwähnten Quanteneffekte nicht, den Schwerkraft-Kollaps aufzuhalten. Wo er endet, hängt von der genauen Masse des Sterns ab. Ist sie nicht ganz so groß, erreicht das System einen stabilen Zustand, nachdem die Elektronen förmlich in die Atomkerne gedrückt worden sind und sich dort mit den Protonen zu Neutronen vereinigt haben.

Der resultierende Neutronenstern hat nur zwanzig bis vierzig Kilometer Durchmesser, kann in diesem Volumen aber bis zu zwei Sonnenmassen vereinigen. Seine Materie hat eine extrem hohe Dichte: Ein Stecknadelkopf würde auf der Erde knapp eine Million Tonnen wiegen – so viel wie ein Eisenwürfel mit einer Seitenlänge von fünfzig Metern.



Das rund 400 Lichtjahre entfernte Objekt RX J1856.5-3754 im Sternbild Südliche Krone – hier eine Aufnahme im Röntgenlicht – ist kleiner, als es die Modelle für Neutronensterne zulassen. Deshalb vermutet ein internationales Wissenschaftlerteam darin einen neuartigen Quarkstern, der aus „seltsamer Materie“ besteht.

NASA / SAO / CXC / J. DRAKE ET AL.

Wenn der Sternrest nach dem Abstoßen der Hülle mehr als das Zwei- bis Dreifache der Sonnenmasse hat, macht der Kollaps auch nicht auf der Stufe des Neutronensterns Halt. Er setzt sich vielmehr so weit fort, bis eine Raumregion entsteht, aus der weder Licht noch Materie nach außen entkommen kann – ein so genanntes Schwarzes Loch.

Weißer Zwerg, Neutronenstern und Schwarzes Loch – das schienen bisher die einzig möglichen Endzustände von Sternen zu sein. Doch nun haben Beobachtungen mit dem Röntgensatelliten Chandra und dem Hubble-Weltraum-Teleskop Hinweise auf einen weiteren Typ von Sternleiche ergeben. Hauptkandidat ist ein Himmelskörper mit dem nicht eben klangvollen Katalognamen RX J1856.5-3754 (Bild oben). Astronomen des Smithsonian Astrophysical Observatory, des MIT Center for Space Research und der Universität Tübingen haben ihn näher unter die Lupe genommen und dabei Seltsames entdeckt.

Das Röntgenspektrum von RX J1856.5-3754 entspricht dem eines so genannten Schwarzen Körpers: eines Objekts im thermodynamischen Gleichgewicht, dessen Strahlungseigenschaften ▶

nur von seiner Temperatur abhängen. Nimmt man an, RX J1856.5-3754 sei annähernd kugelförmig, dann läßt sich seine Ausdehnung aus einem Gesetz erschließen, das die Temperatur und die Oberfläche eines Schwarzen Körpers mit der Energiemenge verknüpft, die er pro Zeiteinheit abstrahlt.

Die Temperatur des Sterns ergibt sich aus seinem Röntgenspektrum. Aus Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraum-Teleskop geht andererseits hervor, wie weit RX J1856.5-3754 von uns entfernt ist. Daraus und aus der Messung, wie viel seiner Strahlungsenergie auf der Erde ankommt, läßt sich ermitteln, wie viel Energie der Stern insgesamt abstrahlt. Temperatur und Energiemenge schließlich erlauben, auf die Oberfläche der Kugel und daraus auf ihren Radius zurückzuschließen. Das Ergebnis: ein Wert von vier bis acht Kilometern.

Damit wäre RX J1856.5-3754 kleiner, als es die gängigen Modelle für Neutronensterne zulassen. Natürlich ist das Objekt auch kein Schwarzes Loch, das ja selbst keinerlei Strahlung aussendet und das wir nur sehen könnten, wenn es Teil eines Doppelsternsystems wäre. Dann zöge es Materie des Begleiters ab, und diese würde sich stark aufheizen und erhebliche Strahlungsmengen abgeben. Die Beobachtungen im sichtbaren Licht zeigen aber, dass RX J1856.5-3754 keinen solchen Partner hat.

Das Astronomenteam zieht daher die Möglichkeit in Betracht, dass hier ein exotischer Sterntyp vorliegt, den Astrophysiker bislang nur als theoretische Möglichkeit postuliert hatten: ein Gebilde, das aus so genannter seltsamer Materie besteht.

Die Hintergründe dieser Vermutung führen in die Gefilde der Teilchenphysik. Deren gängiger Lehrmeinung zufolge setzen sich die Neutronen und Protonen im Atomkern wiederum aus noch kleineren Partikeln zusammen, die als Quarks bezeichnet werden. Es gibt sie in sechs verschiedenen Typen, von denen aber nur zwei in normaler Materie vorkommen. So besteht das Proton aus zwei Quarks vom Typ „Up“ („Auf“) und einem Quark vom Typ „Down“ („Ab“), das Neutron aus zwei Down- und einem Up-Quark.

Die Eigenschaften der starken Kernkraft, die Quarks aneinander bindet, sorgen dafür, dass diese Teilchen in der Natur niemals isoliert auftreten, sondern ausschließlich in Zweier- oder Dreiergruppen wie den erwähnten Protonen und Neutronen. Schon länger vermuten Teilchenphysiker aber, dass sich Quarks bei extrem hohen Temperaturen aus der Paar- oder Dreierbindung befreien und zu einem dichten Gemisch nicht fest gebundener Einzelteilchen zusammenschließen können. Vermutlich war der Kosmos in seiner Frühzeit mit einem solchen „Quark-Gluon-Plasma“ angefüllt. Im Labor konnte es zwar noch nicht definitiv nachgewiesen werden, aber Experimente in Teilchenbeschleunigern lieferten deutliche Hinweise auf seine Existenz (siehe „Der Urknall im Labor“, Spektrum der Wissenschaft 5/1999, S. 56).

Materie aus isolierten Quarks

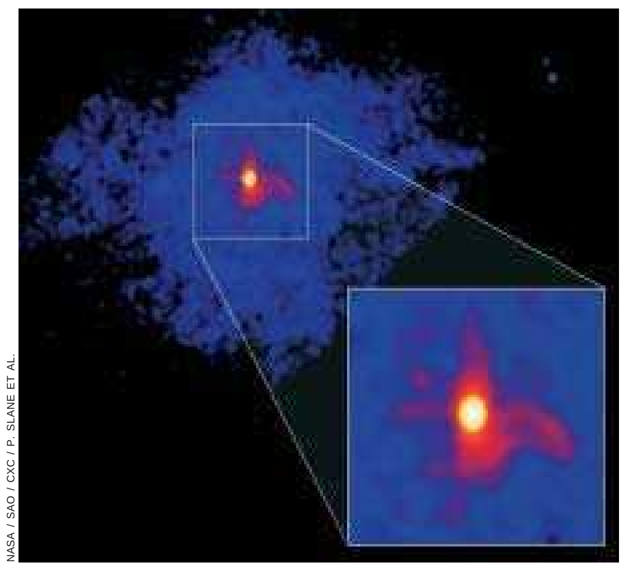
Einer noch weitergehenden Hypothese zufolge stellt ein solches Quarkgemisch vielleicht sogar den energieärmsten Zustand dar, in dem sich Kernmaterie überhaupt befinden kann. Dazu müsste in der Mixtur allerdings außer den Up- und Down-Quarks noch eine weitere Quarksorte vertreten sein, die das willkürliche Attribut „strange“, also „seltsam“ erhalten hat. Wegen ihrer Anwesenheit wird das ganze Gemisch seltsame Materie genannt.

Ob es sich dabei tatsächlich um den Kernmaterie-Zustand geringstmöglicher Energie handelt, lässt sich der Standardtheorie der starken Kernkräfte, der Quantenchromodynamik, bislang nicht eindeutig entnehmen. Umso wichtiger sind die astronomischen Beobachtungen: Ist ein Übergang zu seltsamer Materie energetisch günstig, so könnte er sich im dichten Zentrum eines Neutronensterns vollziehen und diesen im Endeffekt vielleicht sogar ganz transformieren. Der resultierende „seltsame Stern“ wäre auch bei geringerem Volumen noch stabil. Das würde erklären, warum RX J1856.5-3754 so ungewöhnlich klein ist.

Noch ein Kandidat für seltsame Materie im All ließ sich mit dem Chandra-Observatorium ausmachen. Im Sternbild Kassiopeia befindet sich ein Sternrest mit der Katalognummer 3C58 (Bild links unten). Er ist mit großer Wahrscheinlichkeit bei einer Supernova-Explosion entstanden, die japanische und chinesische Astronomen im Jahre 1181 beobachtet haben. Messungen seiner Röntgenstrahlung, die Astronomen vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und von der Columbia-Universität in New York vorgenommen haben, zeigen allerdings, dass 3C58 weit kühler ist, als für Neutronensterne solch – astronomisch gesehen – geringen Alters zu erwarten wäre. Einen Ausweg böte die Annahme, dass im Inneren des Neutronensterns seltsame Quarkmaterie anzutreffen ist.

So aufregend die genannten Beobachtungen sein mögen – dingfest gemacht ist der neue Materietyp damit noch nicht. Beispielsweise gibt es für das rapide Abkühlen von 3C58 auch andere Erklärungen, die ohne seltsame Materie auskommen. Und die geringe Ausdehnung von RX J1856.5-3754 könnte nur vorgetäuscht sein, weil die Röntgenastronomen in Wirklichkeit einen kleinen heißen Fleck auf der Oberfläche eines herkömmlichen Neutronensterns beobachten. Gegen diese Möglichkeit spricht allerdings, dass es dann höchstwahrscheinlich Intensitätsschwankungen der Röntgenstrahlung gäbe, die nicht beobachtet werden.

Die geschilderten Befunde sind jedenfalls interessant genug, um zu weiteren Beobachtungen anzuspornen. Mit etwas Glück werden die dann erweisen, ob unser Kosmos – oder zumindest die darin enthaltene Materie – wirklich noch weit seltsamer ist, als bislang geahnt. ■



NASA / SAO / CXC / P. SLANE ET AL.

Das Objekt 3C58 im Sternbild Kassiopeia in rund 10 000 Lichtjahren Entfernung entstand höchstwahrscheinlich bei einer Supernova-Explosion, die japanische und chinesische Astronomen im Jahre 1181 beobachtet haben. Damals wurde Gasmaterial in den Weltraum geschleudert, das im Röntgenbereich strahlt. 3C58 ist weit kühler, als für Neutronensterne solch – astronomisch gesehen – geringen Alters zu erwarten wäre. Deshalb könnte es sich gleichfalls um einen Quarkstern handeln.

Markus Pössel *promoviert am Albert-Einstein-Institut in Potsdam im Bereich Quantengravitation.*

Auferstanden aus Ruinen





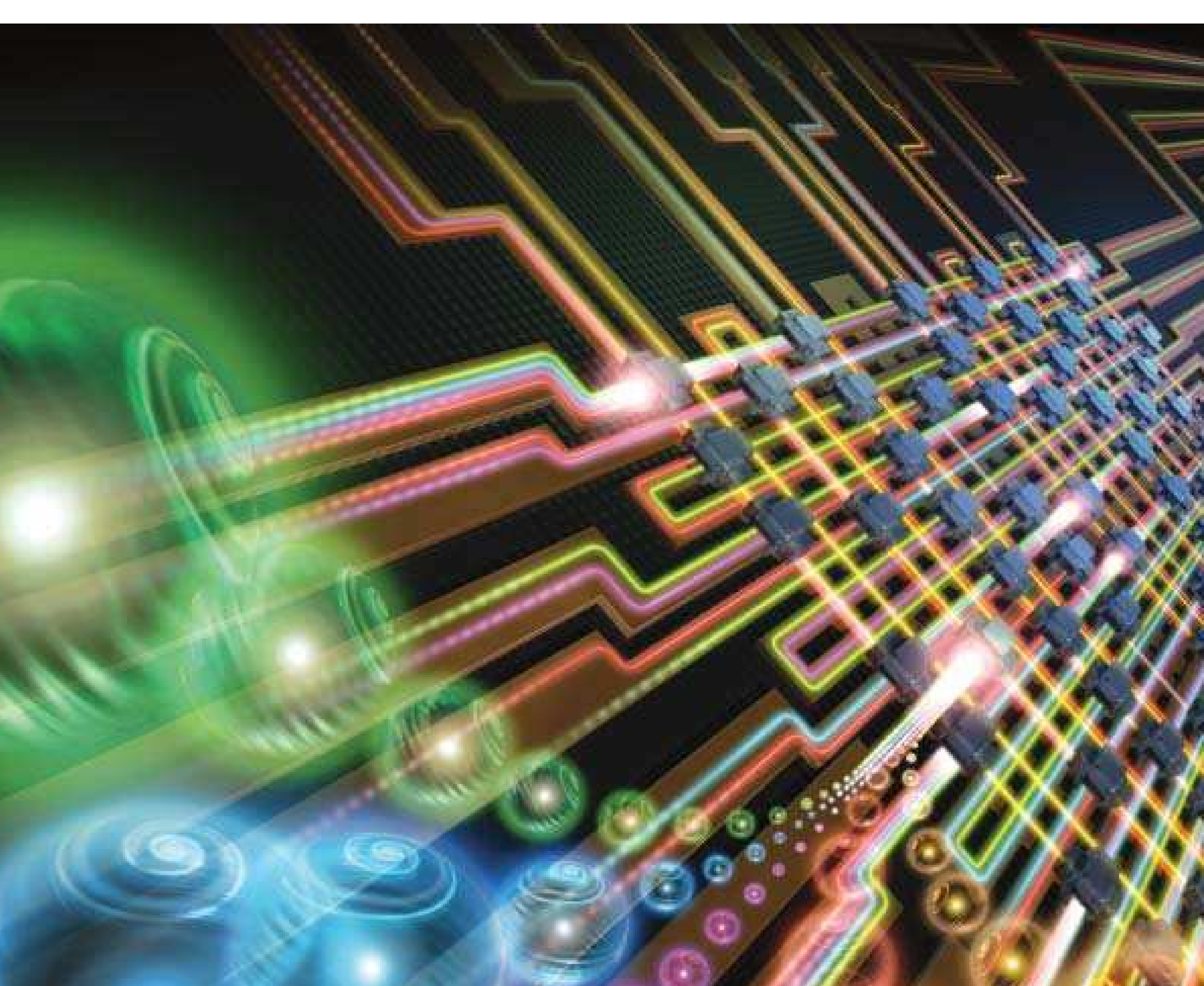
ANTONIO SERRATO-COMBE, UNIVERSITÄT VON UTAH

Die Ausgrabungen im Zentrum von Mexiko-Stadt vermitteln nur noch einen schwachen Eindruck vom einstigen Glanz des Tempelbezirks der aztekischen Hauptstadt Tenochtitlán, die Hernando Cortez 1521 völlig zerstörte. Doch nun hat Antonio Serrato-Combe, Architekturprofessor an der Universiät von Utah in Salt Lake City, die imposante Anlage aus den Trümmern im Computer neu erstehen lassen. In seinem Buch „The Aztec Templo Mayor" (University of Utah Press, 2002) präsentiert er den früheren Schauplatz von Menschenopfern unter den verschiedensten Blickwinkeln, um Raumwirkungen und Proportionen zu verdeutlichen. Dramatische Beleuchtungen – etwa durch die untergehende Sonne oder zuckende Blitze – unterstreichen die Ehrfurcht gebietende Aura des Heiligtums, das von einer gewaltigen Pyramide mit Doppeltempel für den Kriegs- und den Regengott dominiert wird. Für die Rekonstruktion benutzte Serrato-Combe außer den archäologischen Zeugnissen auch Zeichnungen und Beschreibungen aus Codizes der spanischen Eroberer.

Mit Spintronik auf dem Weg zum

Quantencomputer

Die nächste Revolution der Computertechnik steht vor der Tür. Der Träger der elementaren Information ist so klein wie nie zuvor: der Spin eines einzelnen Elektrons. Es gilt, seine quantenmechanischen Eigenschaften nicht als unerwünschte Effekte zu eliminieren, sondern für ungeahnte Leistungen zu nutzen.



Von David D. Awschalom, Michael E. Flatté und Nitin Samarth

Die Miniaturisierung der Halbleiterbauelemente für Computer schreitet unaufhaltsam fort – und stößt damit unweigerlich an eine Grenze: Unterhalb einer Größenordnung von hundert Nanometer melden sich allmählich die Gesetze der Quantenmechanik zu Wort, jenes geheimnisvollen Bereichs der Physik, dessen Aussagen dem gesunden Menschenverstand zuweilen ins Gesicht schlagen und in dem ein biederes Elektron unversehens Eigenschaften einer Welle annimmt.

Pragmatiker der Halbleitertechnik geben sich alle Mühe, die Quantenwelt zu meiden, indem sie ihre Bauteile mit genialen Tricks dazu zwingen, sich nach den Gesetzen der klassischen (nichtquantenmechanischen) Elektronik zu verhalten. Einige von uns jedoch glauben, man sollte den Stier bei den Hörnern packen, statt ihm davonzulaufen: Unter Nutzung der Merkwürdigkeiten der Quantenwelt sollten sich völlig neuartige Bauelemente konstruieren lassen, welche die Leistung der herkömmlichen um Größenordnungen übertreffen.



Alle Bauteile der Computertechnik, von der Vakuumröhre seligen Angedenkens bis zu den Mikrochips mit ihren Millionen von Transistoren, arbeiten bislang ausschließlich durch Bewegung elektrischer Ladungen. Die Träger dieser Ladungen, die Elektronen, haben jedoch noch eine weitere Eigenschaft, die in der konventionellen Technik ungenutzt bleibt: den „Spin" („Drall"), der eng mit dem Magnetismus verknüpft ist. Diesen zu nutzen ist das Ziel einer neuen Technik, die den Namen Spintronik (kurz für Spin-Elektronik) oder Magneto-Elektronik erhalten hat.

Seit jeher dient der Magnetismus (und damit indirekt der Elektronenspin) zur Speicherung von Information. Schon die frühesten Computer-Festplatten speicherten ihre Bits in Form magnetisierter Bereiche, und der magnetische Widerstand, eine durch ein Magnetfeld verursachte Änderung des elektrischen Widerstands, diente zum Auslesen dieser Information. So verwundert es nicht, dass der erste Erfolg der Spintronik auf dem Gebiet der Speichermedien erzielt wurde. Die meisten Notebook-Computer verfügen heute über eine Festplatte, die auf jedem Quadratmillimeter so viele Daten unterbringt wie nie zuvor. Das funktioniert durch einen Spintronik-Effekt, den so genannten Riesen-Magnetowiderstand (*giant magnetoresistance*, GMR).

Andere spintronische Speichertechniken sind schon weit vorangeschritten: In den nächsten Jahren wird der MRAM (*magnetic random access memory*, magnetischer Arbeitsspeicher) auf den Markt kommen. Ein solcher Speicher behält seinen Zustand bei, auch wenn der Strom abgeschaltet wird, aber im Unterschied zu den derzeit üblichen nichtflüchtigen Speichern können die Umschaltraten und die Zugriffsgeschwindigkeit es durchaus mit konventionellen Arbeitsspeichern aufnehmen.

In heutigen Leseköpfen und magnetischen Arbeitsspeichern bestehen die wichtigsten Teile aus ferromagnetischen Metall-Legierungen. Diese metallischen Bauelemente bilden die erste – und ausgereifteste – Ausprägung der Spintronik. Die zweite besteht darin, spinpolarisierte Ströme in Halbleitern statt in Metallen fließen zu lassen. Sowie die Ingenieure diese Kunst beherrschen, steht ihnen die ganze Vielfalt der Herstellungstechniken zur Verfügung, die mit so phänomenalem Erfolg an den Mikroelektronik-Chips entwickelt worden sind. Obendrein haben Halbleiter äußerst interessante optische Eigenschaften; sie können sowohl optische als auch elektrische Signale verstärken. Denkbar sind ultraschnelle Schalter sowie Mikroprozessoren, die ausschließlich nach Prinzipien der Spintronik arbeiten und Rechenwerke, Speicher sowie Kommunikationshardware auf einem einzigen Chip vereinen.

Vor der industriellen Realisierung dieser Visionen stehen allerdings noch zahlreiche technische Hindernisse: Kann man im großtechnischen Maßstab ferromagnetische Metalle und Halbleiter in integrierten Schaltkreisen verbinden? Kann man Halbleiter herstellen, die bei Zimmertemperatur ferromagnetisch sind? Wie zwingt man spinpolarisierte Ströme (kurz: „Spinströme") wirksam in einen Halbleiter hinein? Was passiert mit ihnen an einer Grenzfläche zwischen zwei Halbleitern? Wie lange bleibt die Polarisierung eines Spinstroms in einem Halbleiter bestehen?

Ein neuer Leistungssprung

An diesen Fragen arbeiten wir in unseren Forschungsgruppen, halten dabei aber die Augen offen für die spekulativste Ausprägung der Spintronik: das Arbeiten mit dem Spinzustand eines einzelnen Elektrons. Damit dringt man endgültig in die faszinierende Quantenwelt ein; denn ein einzelnes Elektron kann sich nicht nur in einem der Zustände „Spin aufwärts" und „Spin abwärts" befinden, sondern auch in einer quantenmechanischen Überlagerung dieser beiden Zustände. Es eignet sich damit als elementares Bauteil für einen Quantencomputer (Kasten Seite 33; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 12/1995, S. 62 und 8/1998, S. 54).

Bislang existieren diese Geräte nur in der Theorie, aber sie berechtigen zu den größten Hoffnungen. Ein Quantencomputer würde zumindest bei bestimmten Aufgaben die Leistung herkömmlicher Rechner um Größenordnungen übertreffen. Zu seiner Realisierung sind die exotischsten Ideen aufgeboten worden: Ionen in magnetischen Fallen, „eingefrorenes" Licht, ultrakalte Quantengase namens Bose-Einstein-Kondensate, magnetische Kernresonanz von Molekülen in Flüssigkeiten – es gibt viele Wege, Schrödingers Katze das Fell über die Ohren zu ziehen (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 86).

Die meisten dieser Konzepte erfordern kühne Vorstöße in weitgehend unerforschtes Gelände. Wir halten es dagegen für sinnvoller, auf der ungeheuer ▶

vielseitigen und vor allem bereits bewährten Halbleiter-Elektronik aufzubauen. In dieser Einschätzung sind wir kürzlich durch eine Reihe unerwarteter Entdeckungen bestätigt worden. Inzwischen messen wir der Spintronik revolutionäres Potenzial bei, sowohl für den Allerweltscomputer als auch für das Fernziel des Quantenrechners.

Der Dreh mit dem Drall

Das englische Wort *spin* (wörtlich: „sich um sich selbst drehen“, wie eine Spindel) spielt auf eine geeignete Modellvorstellung an. Denken Sie sich eine kleine elektrisch geladene Hohlkugel, die sich sehr schnell um sich selbst dreht. Die Ladungen auf der Kugeloberfläche rotieren mit und erzeugen dadurch ein Magnetfeld, ebenso wie die Ladungen, die in einer Drahtspule im Kreis laufen. In der Wissenschaft wird eine Rotation üblicherweise durch einen Vektor (Pfeil) dargestellt, der in Richtung der Rotationsachse weist. Bringt man die sich drehende Kugel in ein äußeres Magnetfeld, so hängt ihre Gesamtenergie davon ab, wie dieser Vektor gegenüber dem Magnetfeld orientiert ist.

In mancher Beziehung ist ein Elektron wie eine solche rotierende geladene Kugel. Es hat einen Drehimpuls, den „Spin“, und damit verknüpfte magnetische Eigenschaften, und in magnetischer Umgebung hängt seine Energie von der Orientierung des Spinvektors ab. Aber hier endet bereits die Analogie, und die Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik beginnen. Eigentlich sind Elektronen keine kleinen Kügelchen, vielmehr deutet alles darauf hin, dass sie überhaupt keine räumliche Ausdehnung haben. Bei einem punktförmigen Teilchen gibt es aber nichts, was rotieren könnte. Wenn also im Folgenden von der Orientierung des Spinvektors die Rede ist, darf man die Vorstellung von einer Rotationsachse nicht zu wörtlich nehmen.

IN KÜRZE

Der Spin des Elektrons

Zusätzlich zu Masse und elektrischer Ladung haben Elektronen eine Art Eigendrehimpuls, den „Spin“, fast als wären sie rotierende Kugeln.

Mit dem Spin verbunden ist ein magnetisches Feld, ähnlich dem eines winzigen Stabmagneten, der parallel zur Rotationsachse ausgerichtet ist.

Man pflegt den Spin als Vektor darzustellen. Für eine Kugel, die sich von West nach Ost dreht, weist der Vektor nordwärts („aufwärts“), für die umgekehrte Drehrichtung abwärts. Oder („Rechtehandregel“): Wenn die Finger der rechten Hand in Drehrichtung weisen, zeigt der Daumen in Richtung des Vektors. Man pflegt die beiden Zustände kurz als „spin-up“ und „spin-down“ zu bezeichnen.

In einem Magnetfeld haben Elektronen verschiedene Energien, je nachdem, ob ihr Spin auf- oder abwärts weist.

In einem gewöhnlichen Stromkreis sind die Spins zufällig orientiert und beeinflussen den Stromfluss nicht.

Die Spintronik-Bauelemente erzeugen „spinpolarisierte Ströme“ aus Elektronen mit einheitlich ausgerichtetem Spin und lassen einen Strom je nach Polarisierung durch oder auch nicht.



Zu allem Überfluss haben sämtliche Elektronen genau den gleichen Spin, nämlich die Hälfte der fundamentalen quantenmechanischen Drehimpulseinheit. Diese Eigenschaft steckt tief in dem mathematischen Formalismus, der alle Elementarteilchen der Materie beschreibt, und was dieser Formalismus zu bedeuten hat, ist ein sehr weites Feld. Eines der Ergebnisse ist, dass ein Elektron als Elementarteilchen durch Spin, Masse und Ladung vollständig charakterisiert ist.

Ballett der Elektronen

In einem gewöhnlichen elektrischen Strom sind die Elektronenspins zufällig orientiert und spielen auch keine Rolle. Ein Leitungsdraht hat stets denselben elektrischen Widerstand und ein Transistor denselben Verstärkungsfaktor, einerlei wie die Spins der Elektronen, die ihn durchfließen, orientiert sind. Spintronik-Bauelemente dagegen behandeln ihre Elektronen verschieden, je nachdem, ob ihr Spin aufwärts oder abwärts zeigt.

In den Atomen ferromagnetischer Festkörper wie Eisen oder Kobalt neigen die Spins gewisser Elektronen dazu, sich parallel zum Spin ihrer Nachbarn („in Reih und Glied“) auszurichten. In einem stark magnetisierten Eisenstück ist eine einheitliche Ausrichtung der Spins über das ganze Metallstück verbreitet. Fließt ein Strom durch den Magneten, so kommen die Elektronen mit der einen Spinrichtung schlechter durch als die mit der anderen. Am entgegengesetzten Ende sind nur noch die Elektronen mit dem Spin in der bevorzugten Richtung übrig: ein spinpolarisierter Strom.

Ein Ferromagnet kann sogar den Stromfluss in einem benachbarten nichtmagnetischen Metall beeinflussen. So enthalten die Leseköpfe moderner Computer-Festplatten ein so genanntes Spinventil, in dem eine Schicht eines nichtmagnetischen Metalls zwischen zwei ferromagnetischen Metallschichten liegt. Von diesen beiden ist die eine permanent magnetisiert, die andere nicht. Fährt nun der Lesekopf über gespeicherte Daten auf der Computer-Festplatte, so genügen die kleinen Magnetfelder der gespeicherten Einsen und Nullen, um die Magnetisierung der zweiten Schicht in die eine oder die andere Richtung zu ändern, also parallel oder antiparallel zur Magnetisierung der fixierten Schicht. Im Fall paralleler Orientierung fließen nur die Elektronen mit der bevorzugten Spinrichtung leicht durch den Leiter, im anderen Fall wird der Fluss sämtlicher Elektronen stark behindert (daher der Name Riesen-Magnetowiderstand). Über die daraus re-

sultierende Änderung des Stroms erkennt ein GMR-Lesekopf schwächere Magnetfelder als seine Vorgänger, sodass man auf derselben Fläche wie bisher dreimal so viele Daten in entsprechend kleineren Bereichen unterbringen kann.

Ein weiteres dreischichtiges Bauelement, der magnetische Tunnelkontakt (*magnetic tunnel junction*), besteht aus einer dünnen isolierenden Schicht zwischen zwei metallischen Ferromagneten (Kasten rechts). Über die Isolierschicht hinweg kann wegen des quantenmechanischen Tunneleffekts gleichwohl ein Strom fließen. Der Tunnelstrom wird unterbunden, wenn die beiden ferromagnetischen Schichten unterschiedliche Orientierung haben; bei gleicher Orientierung fließt Strom.

Wieder ist eine der beiden ferromagnetischen Schichten permanent magnetisiert; die Orientierung der anderen ist umklappbar und kann damit ein Bit speichern. Diese Schicht behält mit oder ohne Stromzufuhr ihren magnetischen Zustand bei, bis sie neu überschrieben wird. Die schon erwähnten MRAM-Chips bestehen aus sehr vielen magnetischen Tunnelkontakten.

Bislang taugen ferromagnetische Spintronik-Elemente zum Speichern, aber nicht zum Rechnen, genauer: zu den dafür erforderlichen logischen Verknüpfungen. Ein erster Schritt in diese Richtung ist jüngst Russell Cowburn und seinen Kollegen von der Universität Durham (England) gelungen.

Halbleiter mit Effet

Soweit die Spintronik mit metallischen Bauelementen, die von den ferromagnetischen Eigenschaften der Metalle entscheidenden Gebrauch macht. Wie aber soll die Spintronik der zweiten Art, das heißt in Halbleitern, funktionieren? Konventionelle Halbleiter sind nicht ferromagnetisch. Eine Lösung besteht darin, in einem Ferromagneten einen spinpolarisierten Strom zu präparieren und dann in den Halbleiter zu schicken.

Supriyo Datta und Biswajit A. Das, damals an der Purdue University in West Lafayette (Indiana), stellten 1990 ein Modell eines spinpolarisierten Feldeffekttransistors („Spin-FET") vor (Kasten Seite 32). In einem konventionellen FET liegt ein enger Halbleiterkanal zwischen zwei Elektroden, der „Quelle" und der „Senke". Wenn an das „Gate", die dritte Elektrode, die sich über dem Kanal befindet, eine Spannung angelegt wird, so treibt das entstehende elektrische Feld die Elektronen aus dem Kanal und macht ihn dadurch zu einem Isolator. Beim Spin-FET von Datta und Das sind Quelle und Senke ferromagnetisch, sodass der in den Kanal fließende Strom spinpolarisiert ist. Wird am Gate eine Spannung angelegt, klappen die Spins im Kanal um, und die Senke nimmt diese Elektronen mit falscher Orientierung nicht an.

Ein Spin-FET hätte gegenüber einem konventionellen FET diverse Vorteile. Einen Elektronenspin zum Umklappen zu bringen benötigt weit weniger Energie und Zeit, als Elektronen aus dem Kanal hinauszutreiben. Denkbar wäre es auch, die Orientierung von Quelle oder Senke mit einem Magnetfeld zu ändern. Das würde den Spin-FET mit einer zusätzlichen Steuerungsmöglichkeit ausstatten. Denkbar wäre zum Beispiel ein Logikbaustein mit sehr schnell veränderlicher Funktion.

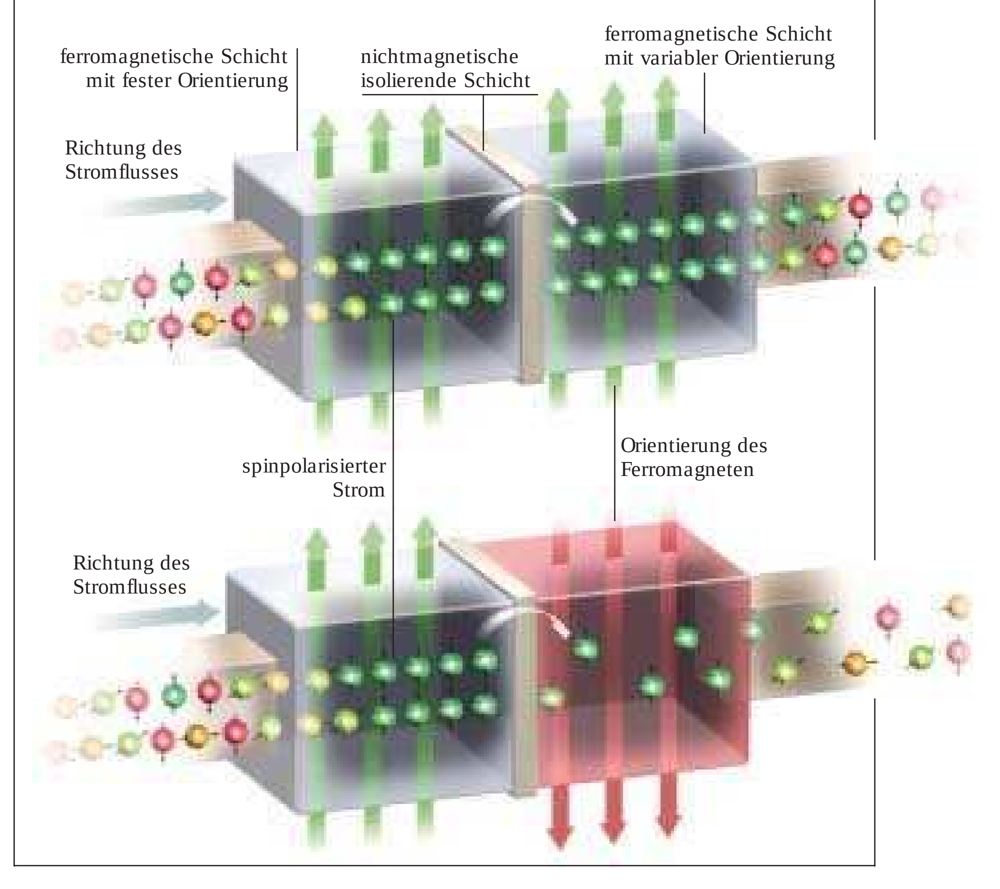
Bisher gibt es jedoch noch keinen funktionierenden Prototyp des Spin-FET von Datta und Das. Es ist nämlich sehr schwierig, Spinströme aus einem ferromagnetischen Metall in einen Halbleiter fließen zu lassen. Neuerdings deuten optische Experimente aus Laboratorien in aller Welt darauf hin – wenngleich die Ergebnisse noch umstritten sind –, dass dies mit unkonventionellen Werkstoffen tatsächlich gelingen könnte: mit Halblei-

Magnetischer Tunnelkontakt

Verschließbare Schleuse für Elektronen

Ein magnetischer Arbeitsspeicher (*magnetic random access memory*, MRAM) speichert Daten in magnetischen Tunnelgrenzschichten, die ihren Zustand auch nach Abschalten des Stroms beibehalten.

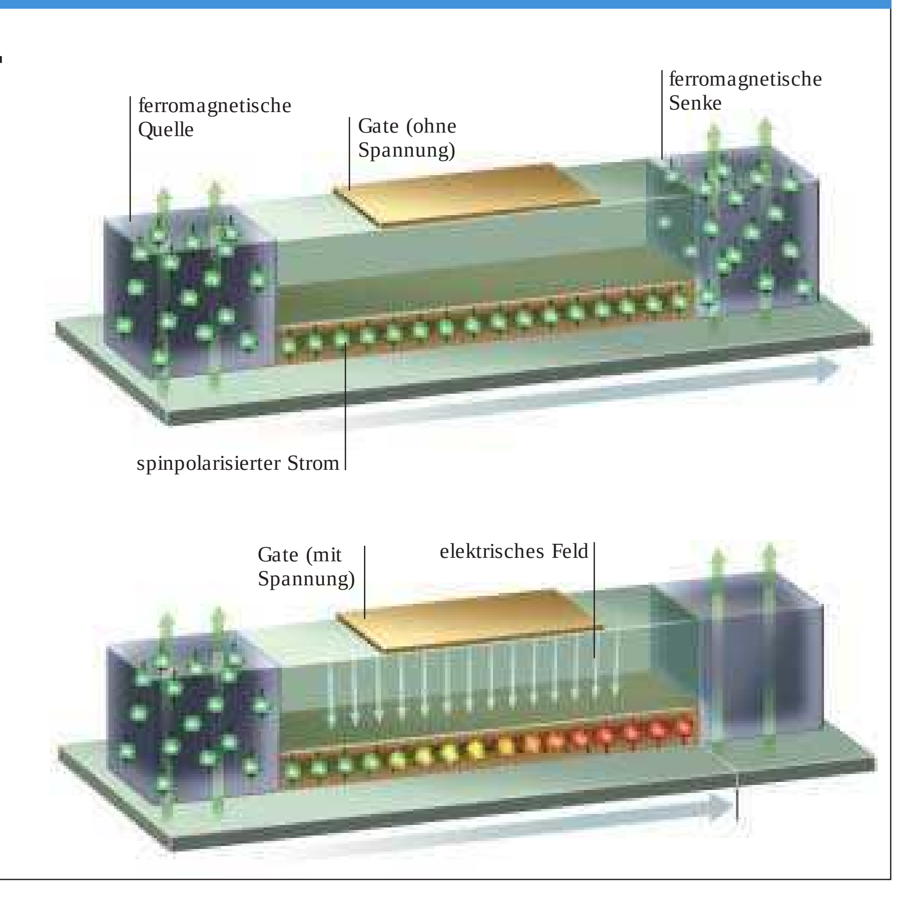
Ein magnetischer Tunnelkontakt besteht aus zwei ferromagnetischen Schichten, die durch eine dünne isolierende Barriere getrennt sind. Die erste Schicht polarisiert die den Strom transportierenden Elektronen. Durch den quantenmechanischen Tunneleffekt können diese die Barriere überwinden, vorausgesetzt, die Magnetisierung beider Schichten weist in dieselbe Richtung (Zustand 0, oberes Bild). Wird die Magnetisierung der zweiten ferromagnetischen Schicht umgekehrt, durchtunneln nur noch sehr wenige Elektronen die Barriere (Zustand 1, unteres Bild).



Spin-Transistor

Elektronen-Kippschalter

Der bislang hypothetische Spintronik-Feldeffekttransistor (Spin-FET) hat wie ein konventioneller FET zwei Anschlüsse namens „Quelle" (*source*) und „Senke" (*drain*), die durch einen engen Halbleiterkanal getrennt sind. In einem Spin-FET sind Quelle und Senke ferromagnetisch. Die Quelle schickt spinpolarisierte Elektronen in den Kanal; dieser Spinstrom fließt ungehindert, wenn er die Senke unverändert erreicht (oben). Eine am dritten Anschluss, dem „Gate", angelegte Spannung erzeugt ein magnetisches Feld in dem Kanal, das die Spins der dahineilenden Elektronen präzedieren lässt (unten): Der Spinvektor kippt allmählich von oben nach unten und passt nicht mehr zur Orientierung des Magnetfelds in der Senke, wodurch diese den Elektronenstrom blockiert. Auf diese Weise einen Strom zu sperren erfordert wesentlich weniger Energie und die Umschaltung weniger Zeit als in einem konventionellen FET, bei dem die Elektronen durch ein stärkeres elektrisches Feld aus dem Kanal hinausgedrängt werden.



tern, die durch Dotierung mit Atomen wie Mangan magnetische Eigenschaften bekommen.

Einige kürzlich hergestellte magnetische Halbleiter zeigen in der Tat Ferromagnetismus und liefern den Rohstoff für einen „schaltbaren Ferromagneten" (*gateable ferromagnet*); dieser könnte eines Tages bei Spin-Transistoren eine große Rolle spielen. Dieses Bauelement würde durch eine geringe Spannung vom nichtmagnetischen in den ferromagnetischen Zustand umgeschaltet und umgekehrt. Im eingeschalteten Zustand ist er nur für Elektronen mit der einen Spinrichtung durchlässig, für die anderen aber nicht. Dieser Filtereffekt ließe sich noch verstärken, indem man den schaltbaren Ferromagneten in eine Resonanz-Tunneldiode einbaut. Konventionelle Resonanz-Tunneldioden lassen nur bei einer bestimmten Spannung einen Strom fließen, nämlich dann, wenn die Energie der Elektronen in Resonanz mit der Tunnelbarriere ist. Die Variante mit dem Ferromagneten hätte eine Barriere mit je nach Spinrichtung unterschiedlichen Resonanzspannungen.

Die spannendsten Entwicklungen in der Halbleiter-Spintronik werden wahrscheinlich von Bauelementen bestimmt, die zu entwerfen unsere Fantasie noch nicht ausreicht. Die Schlüsselfrage für diese Spintronik der zweiten Art ist, wie lange Elektronen einen bestimmten Spinzustand beibehalten, wenn sie sich durch einen Halbleiter bewegen oder von einem Material ins nächste gelangen. So kann ein Spin-FET nur dann funktionieren, wenn die Elektronen vom Eintritt in den Kanal bis zu Austritt am anderen Ende polarisiert bleiben.

Solo für ein Elektron

Wie schnell eine Spinpolarisation abklingt, wird zur alles entscheidenden Frage, wenn es um einen Quantencomputer auf der Basis von Elektronenspins geht. Dabei muss man die so genannte Quantenkohärenz beherrschen, das heißt, alle Daten tragenden Komponenten des Computers müssen ihre Quanteneigenschaften hinreichend lange behalten. Wenn diese Eigenschaften an die Ladungen von Elektronen gebunden sind, geht die Kohärenz durch Dissipation schon binnen Pikosekunden (10^{-12} Sekunden) verloren, selbst bei sehr tiefen Temperaturen. Die Quanteneigenschaften des Spins müssten von Natur aus deutlich haltbarer sein, wenn ein Quantencomputer dieser Bauart funktionieren soll. Das ist in der Tat der Fall, wie wir durch einen glücklichen Zufall entdeckten.

Eigentlich hatte das Experiment, das den Durchbruch brachte, ein ganz anderes Ziel. Wir arbeiteten 1997 an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara mit Zinkselenid (ZnSe). Dieser konventionelle Halbleiter ist sehr intensiv erforscht und interessierte uns auch nur als Vergleichsmaterial für die magnetischen Halbleiter, auf die es uns eigentlich ankam. In unserem Experiment brachten wir mit zirkulär polarisierten Lichtpulsen ganze Gruppen von Elektronen im ZnSe in denselben Spinzustand. In einer zirkulär polarisierten Lichtwelle oszilliert nicht die Intensität des elektrischen und des magnetischen Feldes, sondern die Feldvektoren drehen sich im Kreis, transversal zur Ausbreitungsrichtung.

Wir schickten die ultrakurzen (100 Femtosekunden, das sind 10^{-13} Sekunden) Pulse horizontal durch den Halbleiter und brachten dadurch die Elektronen in einen horizontalen Spinzustand: Der Spinvektor wies zunächst in Richtung des Lichtstrahls. In einem vertikalen äußeren Magnetfeld präzedieren die Elektronenspins, das heißt, der Spinvektor selbst dreht sich in der horizontalen Ebene, ähnlich wie die Achse eines gekipp-

ten Kreisels im Gravitationsfeld der Erde im Kreise wandert. Mit Hilfe der Präzession können wir verfolgen, wie lange diese Zustände kohärent bleiben; jedoch hat der horizontale Spin eine weitere, viel wichtigere Eigenschaft.

Für einen makroskopischen Körper wie etwa einen Tennisball ist es nichts Besonderes, mit horizontaler Drehachse zu rotieren. Für ein Elektron ist jedoch ein horizontaler Spinzustand eigentlich eine kohärente quantenmechanische Überlagerung der Zustände „Spin aufwärts“ und „Spin abwärts“. (Dabei definiert ein äußeres Magnetfeld, welche Richtung „oben“ und welche „unten“ ist.) Solche Elektronen sind also in beiden Spinzuständen zugleich. Genau diese Art von kohärenter Überlagerung von Zuständen wird in Quantencomputern genutzt (Kasten rechts).

Erfreulich langsamer Zerfall des Quantenzustands

Leider werden in den meisten physikalischen Systemen diese Überlagerungszustände durch Wechselwirkungen mit der Umgebung schnell zerstört, das heißt, sie gehen in einen der „reinen“ Zustände 0 und 1 über – in welchen, wird vom Zufall bestimmt. Dieser Prozess heißt Dekohärenz. Wie oben erwähnt, bleiben Qubits auf der Basis der Elektronenladung höchstens ein paar Pikosekunden lang kohärent. Das liegt daran, dass die elektrische Kraft zwischen Ladungen stark und von großer Reichweite ist. In traditionellen Halbleiter-Bauelementen ist das ein Segen, denn man kann mit kleinen elektrischen Feldern den Stromfluss sehr fein regeln, für die Quantenkohärenz jedoch ein Fluch.

Elektronenspin-Qubits dagegen haben nur eine schwache Wechselwirkung mit ihrer Umgebung, hauptsächlich über Magnetfelder, die räumlich oder zeitlich variabel sind. Solche Felder lassen sich sehr effektiv abschirmen.

Ziel unseres Experiments war, einige dieser kohärenten Spinzustände in einem Halbleiter zu erzeugen, um zu sehen, wie lange sie überleben würden. Das ist auch dann interessant, wenn es nicht um die Haltbarkeit eines einzelnen Elektronenspins geht, sondern um die eines Kollektivs von Spins, wie in einem Spin-Transistor.

In unserem Experiment maßen wir die Dekohärenzrate durch Verfolgen der Spinpräzession. Jedes Elektron präzediert so lange, wie es in einem kohärenten Überlagerungszustand ist. Wir schickten schwache Lichtpulse in den Halbleiter und erhielten so eine Art stroboskopisches Bild der Spindynamik. Während die Elektronen präzedieren, oszilliert die Intensität des gemessenen Signals; geht die Kohärenz verloren, so fällt die Amplitude der Oszillationen auf null.

Zu unserer großen Überraschung blieben die optisch angeregten Spinzustände in ZnSe bei tiefen Temperaturen mehrere Nanosekunden lang kohärent – tausendmal so lang wie bei den Ladungs-Qubits, und das selbst bei Zimmertemperatur. Weitere Experimente mit Galliumarsenid (GaAs), einem Halbleiter hoher Qualität, der in Handys und CD-Spielern Verwendung findet, zeigten, dass unter optimalen Bedingungen die Spinkohärenz bei tiefen Temperaturen sogar über Hunderte von Nanosekunden erhalten bleiben kann.

Aus diesen Experimenten lernten wir auch, welche Bedingungen für lange Spinkohärenzzeiten entscheidend sind. In erster Linie kommt es auf die Art der Ladungs- und Spin-Träger an. Ein Halbleiter bietet seinen Elektronen gewissermaßen zwei Arten von Plätzen an: das Valenzband, bestehend aus Plätzen niederer Energie, die in der Regel alle besetzt sind, und das Leitungsband bei einer etwas höheren Energie, in dem normalerweise alle Plätze frei sind. Ladungsträger in Halbleitern können in zwei Sorten auftreten: Leitungselektro- ▶

Qubits aus Elektronenspins

Die Kunst der Überlagerung

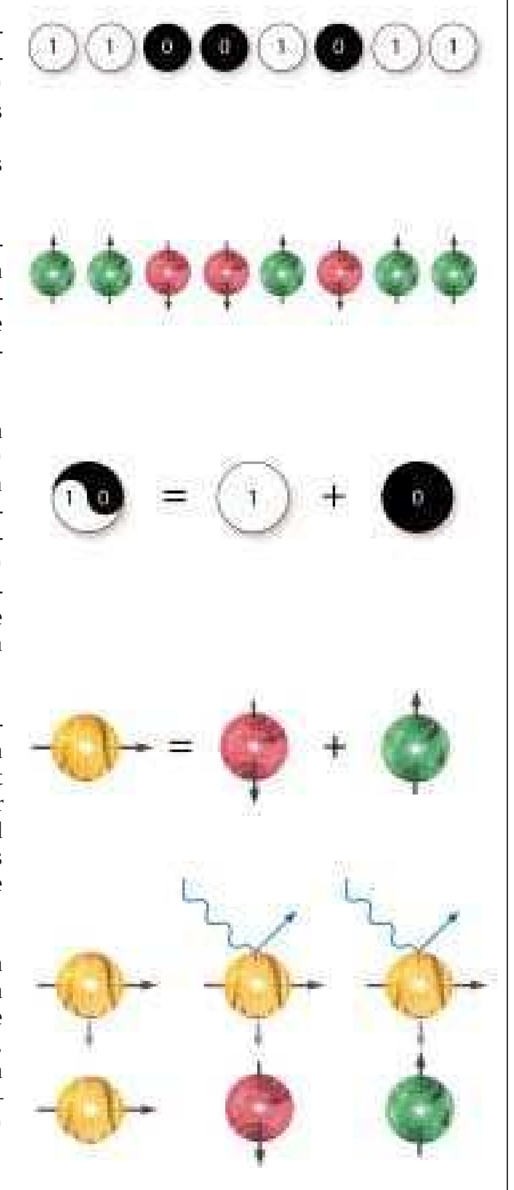
In einem herkömmlichen Computer hat jedes Bit einen wohldefinierten Wert, entweder 0 oder 1. Eine Reihe von acht Bits kann jede Zahl von 0 bis 255 darstellen, jedoch nie mehr als eine zugleich.

Alles, was zwei wohl unterscheidbare Zustände annehmen kann, ist als Bit nutzbar, insbesondere Elektronenspins, die nur aufwärts oder abwärts weisen können.

Ein Quantenbit („Qubit“) kann nicht nur die zwei Zustände 0 und 1 annehmen, sondern auch „Überlagerungen“ dieser Zustände. In einem gewissen Sinne nimmt es die beiden Werte 0 und 1 zugleich an. Entsprechend können acht Qubits alle Zahlen von 0 bis 255 zugleich darstellen.

Elektronenspins sind ideale Kandidaten für Qubits: Ein Elektron mit waagerechtem Spinvektor ist eine kohärente Überlagerung der Zustände „Spin aufwärts“ und „Spin abwärts“ und stabiler als andere quantenmechanische Elektronenzustände.

Gleichwohl ist ein Qubit ein sehr empfindsames Gebilde. Ein verirrtes Photon genügt, und die Kohärenz bricht zusammen, wodurch sich das Qubit in ein gewöhnliches Bit verwandelt – je nach Zufall mit dem Wert 0 oder 1.



nen, das heißt Elektronen im Leitungsband, und Valenzlöcher, das sind freie Plätze im Valenzband. Auch Löcher tragen einen Spin, denn in einem voll besetzten Valenzband addieren sich alle Spins zu null. Durch das Entfernen eines Elektrons wird dieses Gleichgewicht gestört, ebenso wie das Ladungsgleichgewicht: Löcher sind positiv geladen.

Finger weg von Löchern

Löcher haben dramatisch kürzere Spin-Kohärenzzeiten als Elektronen, und ein Elektron kann sehr leicht seinen Spin an ein Loch übertragen und umgekehrt, was die Dekohärenz beider Spins beschleunigt. Es ist daher besser, auf Löcher als Träger von Spin und Ladung ganz zu verzichten. Man beschränke sich auf n-dotierte Halbleiter-Kristalle; das sind solche, die durch Dotieren mit Fremdatomen ein paar Überschusselektronen im Leitungsband haben. Dagegen sind p-dotierte Halbleiter (Kristalle mit Löcherüberschuss) ungeeignet.

Von den Löchern abgesehen, ist die vorherrschende Ursache der Dekohärenz ein relativistischer Effekt: Für einen Körper, der sich mit hoher Geschwindigkeit durch ein elektrisches Feld bewegt, transformiert sich dieses Feld teilweise in ein Magnetfeld. Ein Elektron, das sich in einem Halbleiter bewegt, „verspürt" das elektrische Feld, das durch die Kristallstruktur des Werkstoffes gegeben ist, zu einem gewissen Teil auch als Magnetfeld, und sein Spin präzediert entsprechend. Aus dem Pulk von vielleicht zehn Milliarden Elektronen, die wir in unseren Experimenten auf die Reise schicken, fliegen manche schneller als andere und präzedieren daher auch weiter. Das geht so weit, dass Elektronenspins, die anfänglich parallel waren, nach einer gewissen Zeit in entgegengesetzte Richtungen weisen. Was wir messen können, ist nur die Summe aller Spins, sodass deren Auseinanderlaufen als Abnahme der Kohärenz erscheint. Gleichwohl messen wir eine bemerkenswert lange Kohärenzzeit für das ganze Ensemble, was zu der Hoffnung Anlass gibt, dass einzelne Elektronen noch weit längere Zeiten durchhalten.

Ein Spin muss nicht nur eine Weile erhalten bleiben; er muss auch einen Transport über eine gewisse Entfernung überstehen und schnell und präzise manipulierbar sein. Dass der Transport möglich ist, wurde erstmals in n-dotiertem Galliumarsenid gezeigt. Mit einem Laserpuls wurde ein Pulk kohärent präzedierender Elektronen erzeugt, ähnlich wie in den Lebensdauer-Experimenten, aber dann zog ein seitwärts gerichtetes elektrisches Feld die Elektronen durch den Kristall. Die Spinpakete legten eine Strecke von mehr als hundert Mikrometern zurück, weit mehr als den Durchschnittsweg von Transistor zu Transistor in einem heutigen Mikrochip, und zwar bei nur mäßiger Abnahme der Spinpolarisation (Kasten oben).

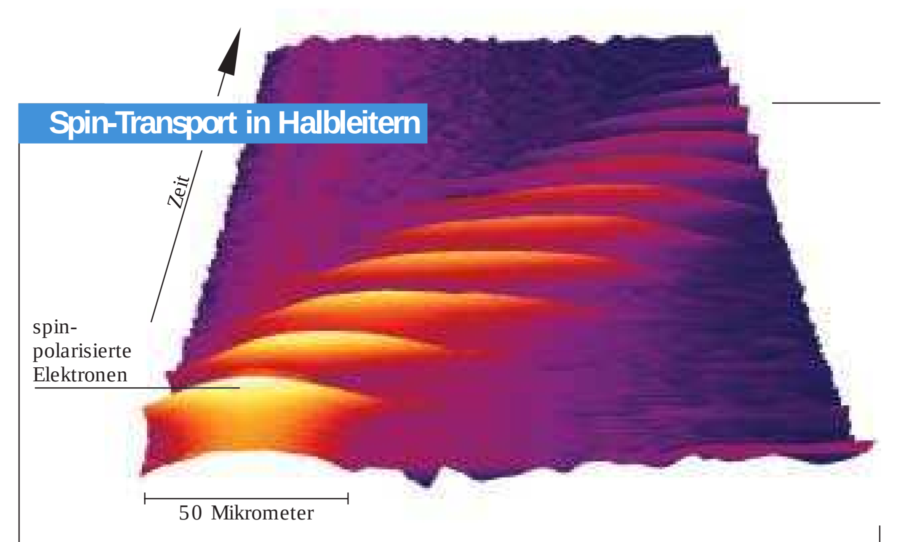
In jüngster Zeit ist es gelungen, Elektronen unter Erhalt der Spinpolarisation über Grenzschichten zwischen Halbleiterkristallen verschiedener Zusammensetzung zu treiben (etwa von GaAs nach ZnSe). Heterostrukturen aus verschiedenen Halbleitern werden in der Mikroelektronik häufig verwendet, von Lasern bis zu Transistoren. Die dort erprobten Konstruktionstechniken könnten auch in der Spintronik angewandt werden.

Kürzlich gelang es auch, mit Laserpulsen von 150 Femtosekunden Dauer kohärente Elektronenspins ein wenig zu kippen; das zeigte, dass solche Spins im Prinzip Tausende von Malen manipuliert werden können, bevor sie ihre Kohärenz verlieren.

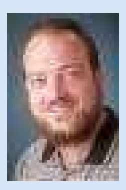
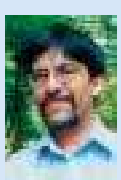
Forscher mit bescheideneren Zielen haben in der Zwischenzeit neue magnetische Halbleiter gefunden und verfeinert, womit sie dem Fernziel des Spintransistors ein Stück näher gerückt sind.

Die Spintronik verbreitet sich zurzeit wie eine Revolution, die an jeder Front rasend schnell neues Terrain gewinnt. Mit den Mitteln der Quantenmechanik wird sie Leistungen vollbringen, die auf klassischem Wege zu erreichen unvorstellbar wäre.

Spin-Transport in Halbleitern



Ein Pulk aus spinpolarisierten Elektronen wird durch ein elektrisches Feld mehr als hundert Mikrometer weit geschleppt – ein entscheidender Schritt auf dem Weg zum spintronischen Quantencomputer. Der ursprünglich ausgeprägte Wellenberg flacht ab, da die Quantenkohärenz der Spinzustände nachlässt.

David D. Awschalom *(links) ist Professor für Physik und Direktor des Center of Spintronics and Quantum Computation an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara.* ***Michael E. Flatté*** *(Mitte) arbeitet über Festkörperphysik und ist Associate Professor an der Universität von Iowa.* ***Nitin Samarth*** *ist Physikprofessor an der Staatsuniversität von Pennsylvania. Awschalom und Samarth experimentieren seit mehr als zehn Jahren gemeinsam auf dem Gebiet der Halbleiter-Spintronik; Flatté stieß während eines Forschungssemesters in Santa Barbara dazu.*

Literaturhinweise

Semiconductor Spintronics and Quantum Computation. Von D. D. Awschalom, D. Loss und N. Samarth (Hgg.). Springer, 2002.

Submicrometer Ferromagnetic NOT Gate and Shift Register. Von D. A. Allwood et al. und R. P. Cowburn in: Science, Bd. 296, S. 2003, 14. Juni 2002.

Microchips That Never Forget. Von A. Cho in: Science, Bd. 296, S. 246, 12. April 2002.

Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future. Von S. A. Wolf et al. in: Science, Bd. 294, S. 1488, 16. November 2001.

Ultrafast Manipulation of Electron Spin Coherence. Von J. A. Gupta, R. Knobel, N. Samarth und D. D. Awschalom in: Science, Bd. 292, S. 2458, 29. Juni 2001.

Meet the Spin Doctors. Von P. Ball in: Nature, Bd. 404, S. 918, 27. April 2000.

Weblinks zum Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis".*

„Alles wird besser“ – ganz von selbst ?

Der Expertenstreit um Lomborgs Anti-Öko-Pamphlet

Von Michael Springer

Im Jahre 1998 publizierte ein junger dänischer Statistik- und Politologieprofessor eine Artikelserie über globale Umweltprobleme in der Zeitschrift „Politiken“; daraus entstand ein Buch in einem kleinen dänischen Verlag und im Herbst 2001 ein dicker Wälzer bei Cambridge University Press. Erst diese englische Ausgabe – „The Skeptical Environmentalist. Measuring the Real State of the World“ von Björn Lomborg – schlug nicht nur in der angelsächsischen Fachwelt wie eine Bombe ein, sondern erregte auch darüber hinaus einiges Aufsehen. In diesem Monat erscheint nun die deutsche Ausgabe des umstrittenen Buchs („Apocalypse: No! Wie sich die menschlichen Lebensgrundlagen wirklich entwickeln“) und gibt uns Anlass, auch hierzulande die wissenschaftliche Debatte um Lomborgs provokante Thesen zu führen.

Auf 600 Seiten Text und mit fast 3000 Fußnoten versucht Lomborg zu widerlegen, was er die Litanei der Umweltforscher nennt. Ob Luftverschmutzung, Klimawandel, Bevölkerungsexplosion oder Artensterben – in jedem Fall widerspricht der dänische Statistiker mit einem Wust von Zahlen den Warnungen der ökologischen Experten. Die Luftverschmutzung sei nicht etwa durch Umweltgesetze zurückgegangen, sondern sinke quasi von selbst durch den technischen Fortschritt in Fabriken, Heizungsanlagen und Kraftfahrzeugen. Der Klimawandel werde von interessierter Seite hochgespielt – das heißt von den Klimaexperten, die davon leben –, sei aber viel milder als meist behauptet. Darum erblickt Lomborg im Klimaschutz-Abkommen von Kyoto einen Irrweg, der immense Kosten verursacht und praktisch nichts nützt.

In ähnlichem Stil bestreitet Lomborg, dass das rasche Anwachsen der Erdbevölkerung ein Problem sei. Vor allem an dieser Stelle entpuppt er sich als Jünger des 1998 verstorbenen Ökonomen Julian Simon, der als Professor für Unternehmensführung an der University of Maryland lehrte und rege Verbindungen zu der politisch rechts stehenden wirtschaftsliberalen Lobby unterhielt. Simon fand, es könne gar nicht genug Menschen auf der Welt geben, denn sie seien die wertvollste Ressource überhaupt. Schon lange vor Lomborg sprach Simon von einer Litanei der Umweltschützer und verkündete wie Lomborg „Alles wird besser und besser“. Simon wettete einmal mit Paul Ehrlich, der mit seinem Bestseller „The Population Bomb“ in den 1960er Jahren den Begriff Bevölkerungsexplosion geprägt hat-

Globale Erwärmung: Lomborg macht es sich zu leicht

Von Stephen Schneider



Seit nunmehr dreißig Jahren diskutiere ich Alternativen für eine nachhaltige Entwicklung, in ständigem Austausch mit Tausenden von Forscherkollegen und politischen Beobachtern; im Laufe der Zeit sind zu dem Thema unzählige Artikel entstanden und Konferenzen abgehalten worden. Trotz alledem, das gebe ich gerne zu, beschleicht mich hin und wieder eine gewisse Frustration angesichts der vielen Unbekannten, die den Klimawandel beeinflussen. Noch immer ist es unmöglich, mit wissenschaftlicher Gewissheit zu entscheiden, ob eine Klimakatastrophe bevorsteht oder nur eine milde Erwärmung – ganz zu schweigen von zuverlässigen Wahrscheinlichkeitsaussagen über all die Behauptungen und Gegenbehauptungen zu Umweltproblemen.

Sogar die glaubwürdigste internationale Autorität, der zwischenstaatliche Klimabeirat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) hat sich geweigert, die Wahrscheinlichkeit künftiger Temperaturwerte im Einzelnen abzuschätzen. Darum waren die Politiker gezwungen, ihre eigenen Vermutungen anzustellen. Werden die Temperaturen bis zum Jahr 2100 um 1,4 oder um 5,8 Grad steigen? Dazwischen liegen Welten – von marginalen Veränderungen bis hin zu großen Katastrophen.

Vor diesem unbefriedigenden Hintergrund hörte ich immer mehr Gerüchte über einen jungen dänischen Statistikprofessor namens Björn Lomborg im Fachbereich Politikwissenschaften an der Universität Aarhus, der mit statistischen Methoden herauszufinden sucht, wie ernst die Umweltprobleme wirklich sind. Natürlich wartete ich gespannt auf die englische Version seines groß angekündigten Buches „The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World“. Ein skeptischer Umweltforscher, dachte ich mir, ist sicher höchst begrüßenswert, denn vieles ist fragwürdig in diesem komplexen Gebiet aus lückenhaften Daten, unvollständigen Theorien und nichtlinearen Wechselwirkun-



Der dänische Statistik-Professor Björn Lomborg bevorzugt optimistische Zukunftsszenarien.

te, dass keine von dessen apokalyptischen Zehnjahresprognosen eintreffen würde – und behielt in allen Punkten völlig Recht.

Spätestens hier wird klar, dass Lomborg, so tendenziös er auch argumentiert, doch einen wunden Punkt getroffen hat: Engagierte Umweltschützer neigen in ihrem durchaus ehrenwerten Anliegen, eine zunächst desinteressierte Öffentlichkeit auf ökologische Probleme aufmerksam zu machen, zu mehr oder weniger krassen Übertreibungen. Und auch Experten heben, wenn sie bei politischen Anhörungen oder öffentlichen Auftritten Wirkung erzielen wollen, gern den schlimmsten von mehreren ökologischen Schätzwerten hervor.

Man muss es tatsächlich – je nach dem Grad des eigenen Engagements für Umweltbelange – peinlich oder komisch finden, wie sehr manche Kassandra übertrieben hat: Nach etlichen Prognosen aus der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts wäre die Erde schon heute für Menschen kaum mehr bewohnbar, die Ressourcen wären erschöpft, die Biosphäre um unzählige Arten dezimiert.

Das heißt wiederum nicht, dass Lomborg etwa Recht hätte mit seiner Gegendevise „Alles wird besser“. Er denkt stets nur in Marktkategorien, destilliert aus unzähligen Statistiken unentwegt Schätzungen von Kosten und Nutzen. Doch gerade in Umweltbelangen ist der Markt ein schlechter Ratgeber – denn der Markt ist blind für alles, was nicht schon auf dem Markt ist.

Darum kann Lomborg zum Schluss kommen, das Kyoto-Protokoll bringe nur Kosten, keinen Nutzen. Darum verfällt er anderswo dem Irrtum, aus stagnierenden Rohstoffpreisen auf unerschöpfliche Reserven zu schließen. Da hat ihm das Lehrbuchwissen, wonach der Preis ein Knappheitsindikator ist, ein Schnippchen geschlagen: Der Markt weiß nicht von allein, was in Jahrzehnten knapp sein wird. Man muss ihm schon auf die Sprünge helfen, etwa durch künstliche Verknappungsaufschläge auf den Preis noch gängiger, aber demnächst absehbar rarer Güter – und ganz allgemein durch Einbeziehen externer Umweltfaktoren in den Preis.

Kurz, ohne aktive Umweltpolitik geht es auf Dauer nicht. Denn von selbst wird nichts besser; man muss es besser machen.

In den nachfolgenden Artikeln gehen drei ausgewiesene – und in Lomborgs Buch namentlich angegriffene – Experten ihres jeweiligen Fachs auf seine Attacken ein. Auf die zuerst im Januar 2002 in Scientific American publizierten Artikel reagierte Lomborg unterdessen mit einer gut dreißigseitigen Verteidigungsschrift, die im Internet sowohl auf der Scientific-American-Webseite (www.sciam.com) zu finden ist als auch auf der Webseite von Lomborg (www.lomborg.org). Außerdem gibt es im Netz eine Webseite seiner Gegner (www.anti-lomborg.com) sowie eine Stellungnahme der Union of Concerned Scientists (www.ucsusa.org/index.html). Damit dürfte die Lomborg-Kontroverse aber noch lange nicht zu Ende sein. ■



***Michael Springer** ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.*

gen. Doch mit dem „wirklichen Zustand der Welt“, wie der englische Untertitel lautet, hat er sich – angesichts der großen Bandbreite plausibler Szenarien – wohl einiges vorgenommen.

Wer ist dieser Lomborg eigentlich, fragte ich mich? Warum bin ich ihm noch nie auf einer der Konferenzen begegnet, wo die üblichen Verdächtigen über Kosten- und Nutzenfaktoren von Umweltmaßnahmen, über Artensterben, ökologische Tragfähigkeit oder Wolken-Rückkopplung debattieren? Ich konnte mich auch nicht erinnern, jemals irgendeinen wissenschaftlichen oder politischen Beitrag von ihm gelesen zu haben. Aber nun lag dieser schwere 600-Seiten-Wälzer vor mir, mit rekordverdächtigen 2930 Fußnoten, und wollte erst einmal durchgearbeitet sein.

Im Vorwort räumt Lomborg ein, er selbst sei kein Experte für Umweltprobleme – das wahrste Wort des gesamten Buches, wie ich im Folgenden illustrieren möchte. Ich werde mich auf das umfangreiche Kapitel über globale Erwärmung und seine gut 600 Fußnoten konzentrieren. Allein die schiere Masse an Details erweckt zumindest den Anschein einer umfassenden und sorgfältig recherchierten wissenschaftlichen Arbeit. Doch wie weit entspricht dem die Realität des Textes? Der Leser wird die Antwort ahnen – doch zunächst einige Beispiele, um zu verdeutlichen, was ich aus Lomborgs Buch erfahren habe. Sein Klima-Kapitel macht vier Kernaussagen:

Die **Klimaforschung** steht zwar generell auf höchst wackligen Füßen, doch nichtsdestoweniger ist der wahre Stand der Wissenschaft der Folgende: Die Sensitivität des Klimas gegenüber atmosphärischem Kohlendioxid ist am untersten Ende der vom IPCC angenommenen Unsicherheitsspanne anzusetzen – wobei laut IPCC 1,5 bis 4,5 Grad Celsius Erwärmung zu erwarten sind, wenn der CO_2-Gehalt der Erdatmosphäre sich verdoppelt und dann konstant bleibt.

Die mehr als vierzig **Emissionsszenarien** des Anfang 2000 vom IPCC herausgegebenen Emissionsberichts (*Special Report on Emission Scenarios*, SRES) zerfallen in sechs „gleichermaßen stichhaltige“ Alternativpfade. Diese fangen bei einer Verdoppelung der CO_2-Konzentration bis zum Jahr 2100 an und hören bei einer Verdreifachung im Laufe des 22. Jahrhunderts noch lange nicht auf. Lomborg jedoch lässt ausschließlich das günstigste Szenario gelten: Die Temperaturen werden ihm zufolge weit weniger ansteigen, als die Maximalschätzungen des IPCC annehmen; wahrscheinlich wird noch nicht einmal der Wert des niedrigsten Emissionsszenarios – weniger als 2 Grad bis 2100 – erreicht, und mit Sicherheit, so Lomborg, wird die Temperatur im 22. Jahrhundert nicht weiter ansteigen.

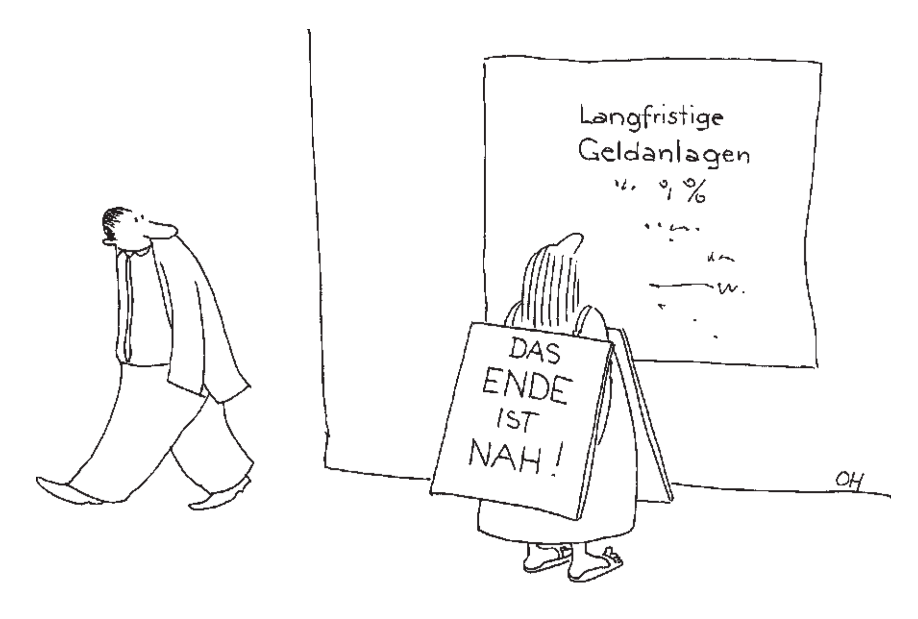
Wie **Kosten-Nutzen-Rechnungen** zeigen, könnte das Vermeiden des Klimawandels zwar enormen Nutzen bringen – Lomborg zitiert nur die Zahl 5 Billionen US-Dollar –, doch steht dies in keinem Verhältnis zu den ökonomischen Kosten des Versuchs, den durch Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Schadstoffausstoß einzudämmen; Lomborg entnimmt der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur dafür eine riesige ▶

Bandbreite von 3 Billionen bis 33 Billionen Dollar. Für die klimabedingten Schäden gibt er hingegen nur eine Zahl an.

Das **Kyoto-Protokoll**, das den Ausstoß von Treibhausgasen in den Industrieländern begrenzen soll, sei viel zu teuer. Zudem würde es die Erwärmung bis 2100 lediglich um wenige Zehntelgrade reduzieren und somit, so Lomborg, den Temperaturanstieg nur sechs Jahre aufschieben. Doch diese Zahl basiert auf einer unsinnigen Annahme, die niemand ernsthaft in Erwägung zieht: Lomborg schreibt das Kyoto-Protokoll, das nur bis 2012 gilt, als alleinige Weltklimapolitik um weitere neunzig Jahre fort.

Bevor ich nun darauf eingehe, warum ich all diese Behauptungen für fatale Verzerrungen der Realität halte, sollte ich ein paar Worte über Lomborgs Methoden verlieren. Erstens verweisen die meisten seiner fast 3000 Zitate auf Sekundärliteratur und Zeitungsartikel. Und wenn er doch einmal aus wissenschaftlichen Fachartikeln zitiert, dann einseitig aus solchen, die seine rosige Sicht unterstützen, allein das untere Ende der Unsicherheitsspannen sei plausibel. Die IPCC-Autoren mussten sich hingegen drei Revisionsrunden durch Hunderte externer Experten unterwerfen. Sie genossen nicht den Luxus, vornehmlich aus dem Teil der Fachwelt zu zitieren, der mit ihnen einer Meinung ist.

Zweitens mutet es doch recht seltsam an, wenn man im populärwissenschaftlichen Buch eines Statistikers keine klare Darstellung des Unterschieds zwischen „objektiven“ (auf klassischen Häufigkeiten beruhenden) und „subjektiven“ (Bayes’schen) Wahrscheinlichkeiten findet. Lomborg verwendet oft das Wort „plausibel“, doch ordnet er – wiederum merkwürdig bei einem Statistiker – diesem „plausibel“ nie einen konkreten Wahrscheinlichkeitswert zu.



Der „Dritte Sachstandsbericht“ (Third Assessment Report) des IPCC stellte sich dagegen ausdrücklich der Notwendigkeit, alle Zuverlässigkeitsaussagen zu quantifizieren. Die Arbeitsgruppe I beispielsweise ordnete dem Ausdruck „wahrscheinlich“ (likely) eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 66 bis 90 Prozent zu. Obwohl das IPCC bei den meisten seiner Modellrechnungen eine große Varianzbreite angibt, ignoriert Lomborg diese Unsicherheitsspannen fast immer und konzentriert sich ausschließlich auf die günstigsten Ergebnisse.

Während ungünstige Resultate Lomborg keine einzige Wahrscheinlichkeitsangabe wert sind, behauptet er steif und fest, das Klima werde sich bis ins 22. Jahrhundert „mit Sicherheit“ um höchstens zwei Grad erwärmen – eine Schlussfolgerung, die nicht nur dem IPCC, sondern auch anderen nationalen Prognosen und den meisten aktuellen Klimastudien widerspricht.

Sehen wir uns die vier Hauptargumente nun genauer an:

Klimaforschung. Ein typisches Beispiel für Lomborgs Methode, Sekundärquellen heranzuziehen, ist die Art und Weise, wie er eine 1989 in der Zeitschrift „Nature“ referierte Studie des britischen Hadley Center zitiert, in der die Forscher ihr Klimamodell modifizierten: „Dann verbesserten die Programmierer die Wolkenparameter an zwei Stellen, und das Modell reagierte mit einer Reduktion seiner Temperaturprognose von 5,2 Grad auf 1,9 Grad.“ Wissenschaftlich korrekt hätte Lomborg den Originalartikel zitieren müssen, in dem die Autoren am Ende des ersten Absatzes einschränkten: „Zu beachten ist, dass das revidierte Wolkenschema zwar mehr Details enthält, aber nicht notwendigerweise präziser ist als das einfachere Modell.“

Ähnlich zitiert Lomborg Richard S. Lindzens umstrittene „stabilisierende Wolkenrückkopplung“, auch Iris-Effekt genannt, als Beweis dafür, dass die vom IPCC angenommene Klimasensitivität auf fast ein Drittel reduziert werden müsse. Entweder hat Lomborg diesen Mechanismus nicht richtig verstanden, oder

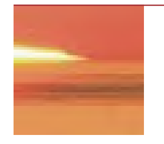
er verschweigt uns, dass Lindzens Theorie auf einer sehr bescheidenen, in wenigen Jahren in einem kleinen Bereich eines Ozeans gesammelten Datenbasis aufbaut. Das Hochrechnen dieser wenigen Daten auf den gesamten Globus gleicht dem Versuch, die stark destabilisierende Rückkopplung über den innerkontinentalen Landmassen während der Schneeschmelze im Frühling auf das globale Klima zu extrapolieren – wobei in diesem Fall die unangemessene Projektion die Klimaempfindlichkeit vermutlich um ein Vielfaches erhöhen würde.

Ein letztes Beispiel: Lomborg zitiert eine umstrittene Hypothese dänischer Wolkenphysiker, wonach magnetische Ereignisse auf der Sonne die kosmische Strahlung beeinflussen und diese wiederum die globale Wolkenbedeckung in geringen Höhen. Mit dieser Hypothese stützen die dänischen Forscher ein alternatives, nicht auf CO_2 basierendes Erklärungsmodell für die Klimaveränderungen der jüngsten Zeit.

Weder Lomborg noch die Autoren dieser spekulativen Theorie diskutieren, wie sich die angeblichen Veränderungen der Wolkenbedeckung auf die Strahlungsbilanz der Erde ausgewirkt haben. Mehr Wolken – das weiß man seit den Arbeiten von Syukuro Manabe und Richard T. Wetherald von 1967 sowie meinen eigenen von 1972 – können die Atmosphäre erwärmen oder abkühlen, je nach Höhe der Wolkengipfel, Reflexionsvermögen der darunter liegenden Erdoberfläche sowie nach Jahreszeit und Breitengrad.

Das IPCC hat diese Theorie verworfen, weil ihre Vertreter bis jetzt keine strahlungsbedingte Beeinflussung des Klimas vorführen konnten, die an die Wirkung näher liegender Faktoren heranreicht – insbesondere an den vom Menschen verursachten Einfluss.

Emissionsszenarien. Lomborg zufolge werden neue, verbesserte Solarkraftwerke und andere erneuerbare Energien in den kommenden Jahrzehnten die fossilen Brennstoffe vom Markt verdrängen, und zwar in solchem Maße, dass die IPCC-Prognosen für den CO_2-Anstieg völlig überhöht sind. Wie sehr wünsche ich mir, Lomborg behielte in diesem Punkt Recht! Doch Wünsche ersetzen keine Analyse. Lomborg zitiert eine einzige Studie und ignoriert die Unzahl an ökonomischen Arbeiten, die er erst später heranzieht, um die Kosten für eine effektive Emissionskontrolle abzuschätzen. In der Tat halten die meisten Wirtschaftswissenschaftler hohe Emissionswerte auch künftig für sehr wahrscheinlich: Eine Verdopplung bis Verdreifachung (oder mehr) des Kohlendioxids gilt ihnen als „optimale" Wirtschaftspolitik. Ich habe diese Literatur kritisiert, weil sie unterschlägt, dass eine aktive Klimapolitik, die konventionelle Brennstoffe gezielt verteuert, Investitionen in alternative Energieformen anregt. Doch solche Anreize setzen eine entsprechende Politik voraus – und Lomborg lehnt diese Politik gerade ab. Kein glaubwürdiger Analytiker kann einfach behaupten, ein Szenario mit intensiver Nutzung fossiler Brennstoffe sei nicht plausibel – und Lomborg gibt auch hier wieder keine Wahrscheinlichkeit dafür an.



Die gröbsten Verdrehungen leistet sich Lomborg bei Kosten-Nutzen-Rechnungen

Kosten-Nutzen-Rechnungen. Die gröbsten Verdrehungen und Vereinfachungen leistet sich Lomborg bei der Wiedergabe diverser Kosten-Nutzen-Rechnungen. Zuerst rügt er jene Regierungen, die Änderungen am vorletzten Entwurf des Berichts von der IPCC-Arbeitsgruppe II verlangten. Diese Änderungen stuften die Bedeutung von ökonomischen Studien herab, welche den durch Klimaveränderungen angerichteten Gesamtschaden zu quantifizieren suchten. Lomborg unterstellt, eine politische Entscheidung habe dem IPCC untersagt, die totale Kosten-Nutzen-Bilanz der globalen Erwärmung zu betrachten.

Seltsam ist, dass Lomborg in diesem Fall ausgerechnet den vorletzten und noch nicht verabschiedeten Entwurf zitiert, dafür aber die allererste Aussage der verabschiedeten Zusammenfassung verschweigt, der zufolge die Auswirkungen der jüngsten Temperaturentwicklung auf die Tier- und Pflanzenwelt bereits erkennbar sind. Ganz allgemein fällt auf, dass Lomborg die ökologischen Folgen des Klimawandels nicht diskutiert. Lieber konzentriert er sich auf Gesundheitswesen und Landwirtschaft, denn diese Bereiche werden seiner Meinung nach durch die minimalen Klimaänderungen, die er vorhersagt, kaum betroffen.

Die Regierungsvertreter hatten einen guten Grund, die Bedeutung von aggregierten Kosten-Nutzen-Studien herabzustufen: In solchen Studien fehlt die Aufschlüsselung in zahlreiche Schadenskategorien, die für politische Entscheidungsträger wichtig sind; übrig bleibt eine grobe Richtschnur für Transaktionen zwischen Marktsegmenten. Die „totale Kosten-Nutzen-Analyse", die Lomborg wünscht, müsste vieles berücksichtigen, das kaum in harter Währung zu beziffern ▶

RICHARD HAMILTON SMITH / CORBIS


JIM BRANDENBURG / MINDEN PICTURES

Klimaforscher wollen eine globale Erwärmung mit katastrophalen Folgen nicht ausschließen. Lomborg hält solche Zukunftsszenarien für pure Panikmache.

ist: Tier- und Pflanzenarten verschwinden – welchen Wert soll man ihnen zumessen? Die Natur leistet uns wertvolle Dienste, die wir selbstverständlich ohne Bezahlung entgegennehmen – doch in wie vielen Dollars kann man zum Beispiel eine verschlechterte Wasserqualität ausdrücken? Wer will das wachsende Ungleichgewicht ermessen, da die Folgen des Klimawandels die Armen härter treffen werden als die Reichen – was Lomborg allerdings anerkennt –, oder die sinkende Lebensqualität, wenn etwa der steigende Meeresspiegel die Bewohner einer kleinen Insel aus ihrer angestammten Heimat vertreibt? Rechnen müssen wir wahrscheinlich auch mit heftigeren und extremeren Klimaschwankungen. Wie oben erwähnt, zitiert Lomborg nur eine einzige Bewertung – 5 Billionen Dollar – für die Klimaschäden, obwohl dieselben Ökonomen, aus deren Arbeiten er die Kosten klimapolitischer Maßnahmen bezieht, meist eine enorme Spannweite für die Folgen des Klimawandels anerkennen – von wirtschaftlichem Gewinn bis zu gewaltigen Verlusten.

Gerade weil seriöse Wissenschaftler solche katastrophalen Folgen nicht mit hoher Sicherheit ausschließen können, raten sie dringend zu Gegenmaßnahmen. Es ist pure Willkür, wenn jemand die dadurch möglicherweise vermiedenen Klimaschäden mit einer einzigen Zahl beziffert, statt eine breite Varianz anzugeben – vor allem, wenn er auf der anderen Seite eine breite Spanne für die Kosten klimapolitischer Initiativen anführt. Diesen Schwankungsbereich entnimmt Lomborg der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur, ignoriert jedoch ingenieurwissenschaftliche Aspekte. Ingenieure bezweifeln die typischen Prognosen der Ökonomen, da diese die bereits vorhandenen Mängel des Marktgeschehens vernachlässigen, wie Energie verschwendende Maschinen, Häuser und Produktionsverfahren. Gemäß einer berühmten ingenieurtechnischen Studie, die von fünf Labors des US-Energieministeriums erarbeitet wurde – gewiss kein Hort radikaler Umweltschützer –, könnte eine Klimapolitik, die wirksame Anreize zum Einsatz modernster Energie sparender Technik schafft, den Ausstoß einiger Schadstoffe sogar reduzieren, ohne dass dies die Volkswirtschaft etwas kostet. Ganz im Gegenteil, dabei könnte sogar ein Plus herauskommen.



Wir könnten bloß harmlose Veränderungen erleben – aber auch Klimakatastrophen

Das **Kyoto-Protokoll**. Indem Lomborg so tut, als würde das für zehn Jahre konzipierte Kyoto-Protokoll ein Jahrhundert lang in Kraft bleiben, verzerrt er den gesamten klimapolitischen Prozess. Jeder IPCC-Bericht hat deutlich gemacht, dass der Kohlendioxidausstoß um mehr als fünfzig Prozent unter den Wert der meisten Minimal-Szenarien gedrückt werden muss, wenn wir einen starken CO_2-Anstieg am Ende des 21. und im Verlauf des 22. Jahrhunderts vermeiden wollen. Die meisten Analytiker stimmen darin überein, dass die bloße Verlängerung des Kyoto-Protokolls nicht ausreicht. Vielmehr müssen Entwicklungs- und Industrieländer gemeinsam langfristig kostengünstige Lösungen erarbeiten. Lernen durch Tun ist die Devise, denn internationale Zusammenarbeit ist längst nicht Gemeingut. Kyoto ist erst ein Anfang. Doch mit seinem 100-Jahre-Kyoto-Szenario möchte Lomborg selbst diesen ersten Schritt von vornherein vereiteln.

Was ist nun der „wirkliche Zustand der Welt“? Gewiss lässt sich diese Frage nicht mit herkömmlicher Statistik ein für alle Mal beantworten, obwohl subjektive Schätzungen durchaus ihren Wert haben. Die vom IPCC veröffentlichten und von Fachleuten überprüften Bandbreiten liefern die beste Momentaufnahme des wirklichen Klimawandels: Wir könnten Glück haben und nur harmlose Veränderungen erleben – oder im schlimmsten Fall Katastrophen. Das IPCC gibt Entscheidungshilfen für ein Risikomanagement zur Schadensabsicherung. Keinesfalls wird, wie Lomborg uns glauben machen will, alles von selbst wieder gut.

Bei einem solch interdisziplinären Thema wäre Cambridge University Press gut beraten gewesen, das Manuskript sowohl Natur- als auch Sozialwissenschaftlern zur Durchsicht vorzulegen. Herausgegeben wurde es von der sozialwissenschaftlichen Abteilung des Hauses, und darum ist den Lektoren Lomborgs einseitige Darstellung der naturwissenschaftlichen Sachverhalte entgangen.

Das unerfreuliche Resultat sind zornige Rezensionen wie diese. Leider werden viele Laien und Entscheidungsträger die Verrisse gar nicht zu Gesicht bekommen und sich verleiten lassen, Tausende von Zitaten und hunderte Seiten für eine fundierte und ausgewogene wissenschaftliche Arbeit zu halten. Eine bessere Faustregel ist, zu prüfen, wer Unsicherheitsspannen und subjektive Wahrscheinlichkeiten angibt, und vor Leuten auf der Hut zu sein, die meinen, die Wahrheit gepachtet zu haben. ■



Stephen Schneider ist Professor an der Biologischen Fakultät und Senior Fellow am Institut für Internationale Studien der Stanford University. Er ist Herausgeber der Fachzeitschrift „Climatic Change“ sowie der „Encyclopedia of Climate and Weather“. Schneider war auch führend an mehreren Kapiteln der IPCC-Berichte sowie der IPCC-Richtlinien über statistische Unsicherheiten beteiligt.

Bevölkerungswachstum: Lomborg ignoriert die Folgen

Von John Bongaarts



Rund um den Globus vollziehen sich nie da gewesene demografische Veränderungen. Am bekanntesten ist sicherlich das rasante Wachstum der Weltbevölkerung, doch auch andere Entwicklungen bleiben nicht ohne Folgen für das Wohlergehen der Menschheit. Die Menschen leben heute länger und gesünder, die Frauen gebären weniger Kinder, immer mehr Familien ziehen in der Hoffnung auf ein besseres Leben in die Großstädte oder in andere Länder, und vielerorts wächst das Durchschnittsalter.

Lomborg hebt einseitig die positiven Aspekte dieser Trends heraus und unterschlägt die negativen. Sicher haben Umweltaktivisten, die ein Katastrophenszenario globaler Hungersnöte heraufbeschworen und die Bevölkerungsexplosion für fast alle Umwelt-, Wirtschafts- und Sozialprobleme der Welt verantwortlich machten, ihr Anliegen übertrieben. Doch Lomborgs Behauptung, die Anzahl der Menschen sei nicht das Problem, ist schlichtweg falsch.

Durch selektiven Gebrauch von Statistik ruft er den Eindruck hervor, das Bevölkerungsproblem sei in der Zwischenzeit weitgehend überwunden. Tatsächlich ist die jährliche Wachstumsrate der Weltbevölkerung langsam zurückgegangen, doch der absolute Bevölkerungszuwachs reicht noch immer sehr nahe an die Höchstwerte der vergangenen Jahrzehnte heran.

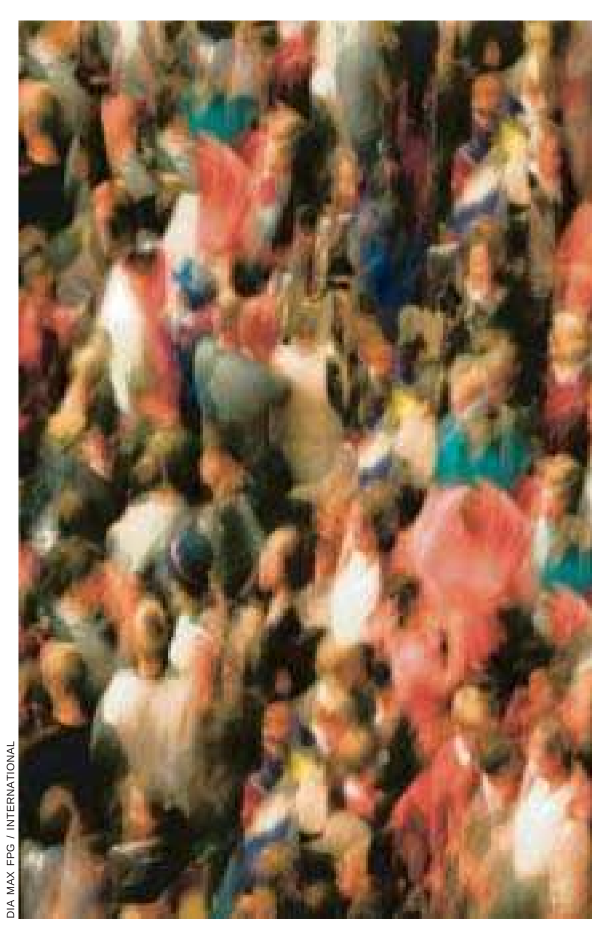
Heute leben ungefähr sechs Milliarden Menschen auf der Erde, drei Milliarden mehr als im Jahr 1960. Nach Berechnungen der Vereinten Nationen werden bis zum Jahr 2050 weitere drei Milliarden hinzukommen, und schließlich wird die Weltbevölkerung etwa zehn Milliarden Menschen umfassen.

Jede Diskussion über globale Entwicklungen führt in die Irre, wenn sie nicht die krassen Unterschiede zwischen den Weltregionen berücksichtigt. In den heute ärmsten Nationen Afrikas, Asiens und Lateinamerikas lebt eine junge und rasch wachsende Bevölkerung, während in den technisch fortgeschrittenen Nationen Europas und Nordamerikas sowie in Japan fast Null- oder gar Minuswachstum herrscht und die Bevölkerung rasch altert.

Infolgedessen wird das globale Bevölkerungswachstum künftig vor allem von den Entwicklungsländern geprägt, wo schon heute vier Fünftel aller Menschen leben. Der für die Zeit von 2000 bis 2025 vorhergesagte Zuwachs in den Entwicklungsländern – von 4,87 auf 6,72 Milliarden – ist ebenso groß wie das Rekordwachstum in den vergangenen 25 Jahren. Die beispiellose Bevölkerungsexpansion in den ärmsten Regionen der Welt setzt sich praktisch ungehemmt fort.

Das bisherige Wachstum hat in vielen Ländern zu hoher Bevölkerungsdichte geführt. Hier macht es sich Lomborg eindeutig zu einfach: Er weist alle Sorgen über diese Tatsache von der Hand, indem er die Bevölkerungsdichte schlicht als das Verhältnis der Einwohnerzahl zur Gesamtfläche berechnet. Einen sinnvollen und genauen Indikator für die tatsächliche Besiedlungsdichte erhält man jedoch erst nach Abzug aller Gebiete, die weder für menschliche Ansiedlung noch für Landwirtschaft geeignet sind, wie Wüsten und unzugängliche Gebirgsregionen. Nach Lomborgs simpler Rechnung beträgt die Bevölkerungsdichte Ägyptens überschaubare 68 Personen pro Quadratkilometer; zieht man jedoch alle unbewässerten Wüstenregionen ab, dann drängen sich nicht weniger als 2000 Menschen auf jedem Quadratkilometer zusammen. Darum ist es auch kein Wunder, dass Ägypten einen großen Teil seiner Nahrungsmittel importieren muss. Mit dem richtigen Maß beziffert, hat die Bevölkerungsdichte insbesondere in den großen Flächenstaaten Asiens sowie im Nahen und Mittleren Osten schon heute extrem hohe Werte erreicht.

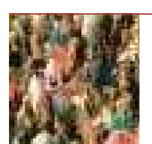
Warum sollte uns das zu denken geben? Seit Jahrhunderten machen die Menschen sich Gedanken über die Auswirkungen von demografischen Entwicklungen auf den Lebensstandard. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts meinte der britische Geistliche und Ökonom Thomas Robert Malthus angesichts steigender Bevölkerungszahlen, der Nahrungsmangel werde diesem Wachstum früher oder später Grenzen setzen. Es stimmt, wie Lomborg und andere Technik-Optimisten bemerken, dass die Weltbevölkerung seither viel rascher gewachsen ist, als Malthus sich vorstellen konnte – in 200 Jahren von einer Milliarde auf sechs Milliarden –, und dass sich zugleich die Qualität der Ernährung verbessert hat. Vermutlich durchaus zu Recht setzen die Technik-Optimisten auf eine wesentliche Steigerung der Nahrungsmittelproduktion in den kommenden Jahrzehnten. Schließlich liegt der globale Durchschnittsertrag noch immer deutlich unter dem Niveau der produktivsten Nationen, und manche Länder verfügen über ungenutzte Böden, die allerdings großenteils bewaldet sind. ▶



DIA MAX FPG / INTERNATIONAL

Die wachsende Weltbevölkerung drängt sich auf jenem kleinen Bruchteil der Erdoberfläche zusammen, der günstig zu bewirtschaften ist. Zusätzliches Acker- und Weideland zu erschließen ist teuer – vor allem inklusive ökologischer Kosten.

Allerdings werden große Investitionen in die Landwirtschaft nötig sein, um die Milliarden zusätzlicher Erdenbürger mit qualitativ hochwertiger Nahrung zu versorgen: Dafür muss in naher Zukunft zwei- oder gar dreimal so viel produziert werden wie heute. Das bereits landwirtschaftlich genutzte Gebiet ist meist hochwertiger als die ungenutzten, im Prinzip noch kultivierbaren Flächen. Auch die heute bestehenden Bewässerungssysteme wurden an den günstigsten Standorten errichtet. Wasser ist in vielen Ländern ein immer knapperes Gut, da sich der Wettbewerb um diese wichtige Ressource zwischen Haushalten, Industrie und Landwirtschaft verschärft. Folglich wird jede weitere Steigerung der Nahrungsmittelproduktion zu einem immer höheren Preis erkauft werden müssen – und zwar erst recht, wenn man die ökologischen Kosten berücksichtigt, die nicht in den Kaufpreis des Agrarprodukts eingehen.



Wir sind dabei, die Erde in eine riesige menschliche Futterkrippe zu verwandeln

Lomborgs Behauptung, die Produktion von mehr Nahrung sei kein Problem, stützt sich in erster Linie auf die niedrigen und bislang stetig sinkenden Weltmarktpreise für Agrarprodukte. Doch diese Zahlen täuschen: Massive staatliche Subventionen, durch die insbesondere die entwickelten Länder ihre Landwirtschaft stützen, halten die Nahrungsmittelpreise künstlich niedrig. Zwar hat auch der technische Fortschritt die Preise gesenkt, doch ohne massive Subventionen wären Nahrungsmittel auf dem Weltmarkt sicherlich teurer.

Wie die Bevölkerungswissenschaftler Paul R. und Anne H. Ehrlich formulieren, ist der Mensch auf dem besten Wege, die Erde in eine gigantische menschliche Futterkrippe zu verwandeln. Um eine wachsende Bevölkerung zu ernähren, muss bisher brachliegendes Land erschlossen, müssen Bewirtschaftungsmethoden intensiviert werden. Darunter leidet die Umwelt: Entwaldung, Artensterben, Bodenerosion und Verseuchung durch Pestizid- und Düngemittelrückstände sind die Folgen. Die Umweltzerstörung möglichst gering zu halten ist durchaus machbar – aber teuer. Ganz offensichtlich wäre der einfachere Weg, das Bevölkerungswachstum in Grenzen zu halten. Lomborg streitet die ökologischen Folgekosten nicht ab, fragt aber nur hilflos: Welche Alternative bleibt uns mit mehr als sechs Milliarden Menschen auf der Erde?

Mit Recht nennt Lomborg die Armut als Hauptgrund für Hunger und Mangelernährung, doch er verschweigt, dass die Bevölkerungsexpansion selbst zur Armut beiträgt. Dieser Effekt kommt durch zwei verschiedene Mechanismen zu Stande. Zum einen führt eine hohe Geburtenrate zu einer jungen Bevölkerung mit bis zu fünfzig Prozent Minderjährigen unterhalb des erwerbsfähigen Alters. Diese Kinder und Jugendlichen müssen ernährt, untergebracht, bekleidet und erzogen werden; doch sie sind nicht produktiv und belasten die Volkswirtschaft.

Zum anderen brauchen all diese Menschen dringend zusätzliche Arbeitsplätze. Die verstärkte Nachfrage nach Arbeit, der ein viel zu geringes Angebot gegenübersteht, drückt auf die Löhne und verstärkt somit Armut und Ungleichheit. Es kommt zur Massenarbeitslosigkeit, und auch wer einen Job findet, lebt in armen Ländern häufig am Rande des Existenzminimums.

Diese beiden widrigen Folgewirkungen für die Volkswirtschaft sind durchaus umkehrbar – wenn es gelingt, die Geburtenrate zu senken. Weniger Kinder entlasten nicht nur die Schulen, sondern erhöhen auch das Verhältnis zwischen Verdienern und Nichtverdienern; zudem geht auf längere Sicht auch die Zahl der Arbeit Suchenden zurück. Diese vorteilhaften demografischen Effekte hatten ihren Anteil am „Wirtschaftswunder“ in mehreren ostasiatischen Staaten. Derart deutliche Besserungen sind natürlich keineswegs garantiert; sie können sich nur in Staaten einstellen, die eine insgesamt vernünftige Wirtschaftspolitik treiben.

Die massive Abwanderung aus den Dörfern der Entwicklungsländer in die Großstädte findet Lomborg begrüßenswert. Gewiss, in der Stadt herrscht in der Regel ein höherer Lebensstandard als auf dem Dorf. Doch heute übersteigt die Flut der Migranten oft die Aufnahmekapazität der Städte, und so endet der Traum vom urbanen Leben für viele Zuwanderer im Elend eines Großstadtslums. In den ärmsten Ländern bröckelt der traditionelle Vorteil der Stadt, und in den Elendsvierteln herrschen häufig nicht weniger katastrophale hygienische Zustände als in den ländlichen Regionen. Daran zeigt sich ein weiteres Problem raschen Bevölkerungswachstums: Die Regierungen sind unfähig, für ihre zusätzlichen Landeskinder zu sorgen. Vielen Entwicklungsländern ist es wirtschaftlich unmöglich, ihre Investitionen in Gesundheit, Bildung und Infrastruktur der steigenden Einwohnerzahl anzupassen.

Zweifellos leben viele Menschen heute besser als noch vor wenigen Jahrzehnten, doch Lomborg unterschlägt, dass dieser positive Trend nicht zuletzt den intensiven Bemühungen einzelner Regierungen und der internationalen Gemeinschaft zu verdanken ist. Investitionen in die Entwicklung und Verbreitung der so genannten Grünen Revolution haben den Hunger gemildert; staatliche Gesundheitsprogramme senkten die Sterblichkeit, und Programme zur Familienplanung reduzierten die Geburtenraten. Doch trotz all dieser Fortschritte sind noch heute ungefähr 800 Millionen Menschen unterernährt, und 1,2 Millionen leben in äußerster Armut.

Diese unerträgliche Situation schreit geradezu nach effektiveren Hilfsmaßnahmen. Lomborg erinnert die entwickelten Länder an ihr Versprechen gegenüber den Vereinten Nationen, 0,7 Prozent des Bruttoinlandsprodukts für Entwicklungshilfe zu spenden. Nur wenige Länder haben das Versprechen erfüllt. Die reichste Nation der Welt, die USA, ist auch eine der geizigsten: Sie spendet nur 0,1 Prozent ihres Bruttoinlandsprodukts. Die Tendenz der staatlichen Entwicklungshilfe zeigt abwärts statt nach oben. Leider verleitet das unablässige „Alles wird gut“, das sich als Grundtenor durch Lomborgs gesamtes Buch zieht, eher zu Selbstgefälligkeit als zu entschlossenem Handeln.

Das Bevölkerungswachstum ist nicht der Hauptgrund aller Wirtschafts-, Umwelt- und Sozialprobleme auf der Welt, aber es hat einen wesentlichen Anteil daran. Wäre die Bevölkerung in der Vergangenheit langsamer gewachsen, ginge es uns heute besser; und wenn wir es schaffen, unser Wachstum zu bremsen, wird es künftigen Generationen besser gehen. ■



John Bongaarts *ist Vizepräsident der Policy Research Division beim Population Council in New York. Von 1998 bis 2000 war er Vorsitzender einer Arbeitsgruppe für Bevölkerungsprognosen der amerikanischen National Academy of Science. Er ist Mitglied der Königlich-Niederländischen Akademie der Wissenschaften.*

Artensterben: Lomborg schert alles über einen Kamm

Von Thomas Lovejoy



Wir Biologen pflegen Statistiken und Statistikern gehörigen Respekt entgegenzubringen. Umso mehr bestürzte mich Lomborgs Einstieg in das Kapitel über biologische Vielfalt: Bevor er sich überhaupt mit dem Problem des Artensterbens und den einschlägigen Zahlen befasst, stellt er die Wichtigkeit des Artenreichtums grundsätzlich in Frage. Auf einer knappen Seite bestreitet er den Wert der biologischen Vielfalt nicht nur als unentbehrlichen Datenfundus für die Biowissenschaften, sondern auch als nützliche Ressource und ökologisches Guthaben – zum Teil, weil es meist keine Märkte für diesen natürlichen Reichtum gebe.

Ist Lomborg dann endlich beim Thema angelangt, richtet er eine heillose Begriffsverwirrung an: Er vermengt den wissenschaftlichen Prozess, durch den eine Art als ausgestorben beurteilt wird, mit den Schätzungen und Prognosen von Aussterberaten. Nach den geltenden, äußerst eng gefassten Regeln muss eine Art, um offiziell für ausgestorben erklärt zu werden, nicht nur der Wissenschaft bekannt sein, sondern auch tatsächlich beim Aussterben beobachtet werden – wie im Fall der letzten Wandertaube, die 1914 im Zoologischen Garten von Cincinnati starb. Andernfalls darf das Tier fünfzig Jahre lang nicht mehr gesichtet worden sein.

Berechnungen von Aussterberaten hingegen beruhen auf der seit langem etablierten Relation zwischen Artenzahl und Fläche; diese Relation – sie datiert aus dem Jahr 1921 und nicht aus den 1960er Jahren, wie Lomborg behauptet – gibt die Rate an, mit der die Artenzahl abnimmt, wenn die Fläche schrumpft.

Davon ausgehend prognostizieren Forscher, wie sich die Reduktion eines natürlichen Lebensraums im Verlust von Tier- und Pflanzenarten niederschlagen wird. Das Verschwinden einer Spezies geschieht nicht unbedingt über Nacht, und so sind manche Exemplare, die den anfänglichen Schwund ihres Lebensraums überlebt haben, in Wahrheit „lebende Tote“ – ihre Art wird auf lange Sicht nicht überdauern können.

Dass Arten aussterben, wenn ihnen nur noch ein Bruchteil ihres ursprünglichen Lebensraums zur Verfügung steht, ist ein bestens dokumentiertes Phänomen – ganz im Gegensatz zu Lomborgs beiläufiger und längst überholter Behauptung, die zu Grunde liegenden wissenschaftlichen Annahmen seien nie glaubhaft erhärtet worden.

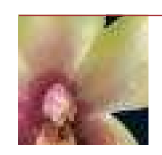
Folglich erledigt sich ein scheinbar eklatanter Widerspruch, den Lomborg präsentiert, in Wirklichkeit von selbst: Der Dezimierung des Atlantischen Regenwaldes in Brasilien auf etwa zehn Prozent seiner ursprünglichen Ausdehnung scheint kein entsprechend hoher Artenverlust gegenüberzustehen. Doch erstens arbeiten in dieser Region nur sehr wenige Feldbiologen, die überhaupt Arten registrieren könnten, geschweige deren Aussterben beobachten. Zweitens spricht sehr viel dafür, dass zahlreiche gerade noch überlebende Arten dem Untergang geweiht sind, falls der Atlanti- ▶

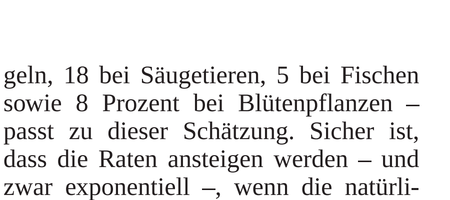
FRANS LANTING / MINDEN PICTURES

Durch menschlichen Einfluss sterben im selben Zeitraum hundert- bis tausendmal mehr Arten aus als unter natürlichen Bedingungen.

sche Regenwald weiterhin so dezimiert und zerstückelt bleibt.

Lomborg gibt ein weiteres Beispiel dafür, dass angeblich Arten den Verlust ihres Lebensraums überlebt haben: Nur wenige Spezies verschwanden, als die Wälder im Osten der USA auf ein bis zwei Prozent ihrer ursprünglichen Ausdehnung schrumpften. Doch so stark ging nur der Altbestand zurück; die gesamte Waldbedeckung fiel nie unter etwa fünfzig Prozent und ermöglichte genügend vielen Arten das Überleben, weil der Wald sogar zusätzliche Flächen zurückeroberte. Folglich steht die relativ geringe Anzahl ausgestorbener Vogelarten überhaupt nicht im Widerspruch zur Fläche-Arten-Theorie, sondern bestätigt sie dagegen.





Lomborgs Diskussion der verheerenden Waldbrände in Indonesien ist irreführend

Bei seiner Analyse für Puerto Rico zitiert Lomborg wieder scheinbar gegenteilige Daten: Obwohl 99 Prozent des Primärwaldes verloren gingen, beherbergt die Insel heute mehr Vögel als vor der Entwaldung. Doch erstens wurde die gesamte Waldbedeckung nie so drastisch dezimiert. Zweitens ignoriert Lomborg, dass sieben der sechzig ausschließlich in Puerto Rico heimischen Arten verloren gingen, während die zusätzlichen Arten Eindringlinge aus anderen Teilen der Welt sind und in sehr unterschiedlichen Lebensräumen zurechtkommen können. Er verfehlt somit den entscheidenden Punkt: Die Vogelfauna der Welt wurde um sieben unersetzliche Arten dezimiert.

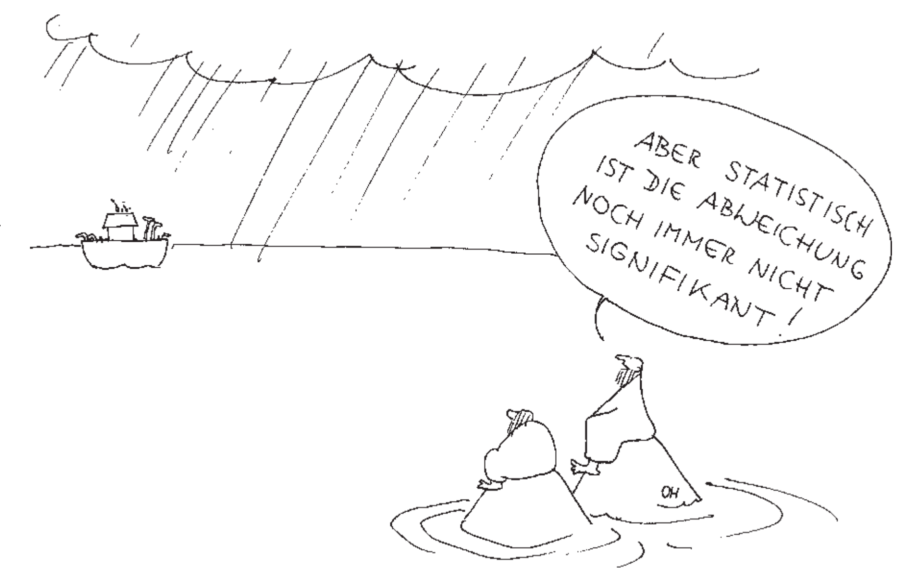
Lomborg nimmt besonderen Anstoß an den Prophezeiungen eines drohenden Massensterbens; im Jahre 1979 schätzte Norman Myers, dass unserem Planeten Jahr für Jahr 40000 Arten verloren gehen. Lomborg hat insoweit Recht, als Myers damals nicht genau erklärte, wie er zu dieser Schätzung gelangt war. Doch immerhin war Myers der Erste, der das Ausmaß des Problems erkannte – und zwar zu einer Zeit, als genauere Berechnungen schwierig waren. Heute formuliert man solche Prognosen üblicherweise als Anstieg über die natürliche Aussterberate hinaus. Dies hat den Vorteil, dass es nicht nötig ist, eine absolute Zahl für sämtliche Spezies auf der Erde anzunehmen. Obwohl den Wissenschaftlern die Gesamtzahl der Arten verborgen ist, können sie durchaus Aussterberaten schätzen. Doch anstatt den neuen Ansatz als wissenschaftlichen Fortschritt anzuerkennen, unterstellt Lomborg zynisch, die Forscher würden von Vielfachen der normalen Rate sprechen, um Eindruck zu schinden.

Schätzungen der gegenwärtigen Aussterberaten reichen vom Hundert- bis zum Tausendfachen des Normalwerts; das heißt, durch menschlichen Einfluss sterben im selben Zeitraum hundert- bis tausendmal mehr Arten aus als unter natürlichen Bedingungen. Die meisten Forscher neigen zum Faktor Tausend. Der Prozentsatz der vom Aussterben bedrohten Tierarten – 12 Prozent bei Vögeln, 18 bei Säugetieren, 5 bei Fischen sowie 8 Prozent bei Blütenpflanzen – passt zu dieser Schätzung. Sicher ist, dass die Raten ansteigen werden – und zwar exponentiell –, wenn die natürlichen Lebensräume weiter schwinden.

Dem sauren Regen widmet Lomborg ein eigenes Kapitel. Seine Recherche ist auch hier oberflächlich, denn er zitiert kaum aus der wissenschaftlichen Fachliteratur. Lomborg behauptet, die Luftverschmutzung durch Großstädte habe nichts mit saurem Regen zu tun – entgegen der Tatsache, dass die Stickoxide (NO_x) aus Autoabgasen eine Hauptursache sind. Er verweist auf eine Studie, wonach saurer Regen die Sämlinge dreier Baumarten nicht geschädigt hat – verschweigt aber, dass Nadelbaumarten, die erwiesenermaßen sehr empfindlich sind, zum Beispiel die Amerikanische Rotfichte, dabei nicht berücksichtigt wurden. Kein Wort bei Lomborg über die Spätfolgen des sauren Regens durch Auslaugung von Bodennährstoffen. Er vermengt die Baumschäden durch Luftverschmutzung vor dreißig bis sechzig Jahren mit der späteren Schädigung durch sauren Regen. Als wäre er Alice im Wunderland, behauptet Lomborg, wir sorgten uns nur deshalb um die Entlaubung der Wälder, weil wir angefangen hätten, sie zu beobachten. Es stimmt einfach nicht, wenn er schreibt, dass kein Fall von Waldsterben bekannt sei, in dem die Säureanreicherung nachweislich eine Hauptursache wäre. Zwei deutliche Gegenbeispiele aus den USA sind die Rotfichte in den Adirondacks und der Zuckerahorn in Pennsylvania.

Auch das Kapitel über den globalen Waldbestand leidet unter oberflächlicher Recherche und selektivem Gebrauch von Zahlen. Lomborg zitiert zunächst Daten der Welternährungsorganisation FAO aus den Jahren 1948 bis 2000. In den Anfangsjahren trug die FAO einfach Summen aus „offiziellen“ Angaben zusammen, die von den Regierungen geliefert wurden; solche Daten sind bekanntlich von uneinheitlicher Qualität und überschätzen häufig den Waldbestand. Später verwendete die FAO so viele unterschiedliche Definitionen und Methoden, dass diese Zahlen für eine fortlaufende Vergleichsstatistik völlig unbrauchbar sind – wie jeder Statistiker wissen sollte.

Lomborgs Diskussion der großen Waldbrände in Indonesien von 1997 ist ein weiteres Beispiel für Irreführung durch selektive Information. Gewiss, die erste Schätzung des WWF (World Wide Fund for Nature) lag bei zwei Millionen Hektar verbrannten Waldes, und Indonesien konterte mit „offiziellen“ Schätzungen zwischen 165000 und 219000 Hektar. Doch Lomborg unterschlägt, dass



Letztere völlig unglaubwürdig waren und dass ein Bericht aus dem Jahre 1999 den tatsächlichen Verlust mit 4,6 Millionen Hektar angibt. Dieser abschließende Bericht wurde von der indonesischen Regierung, der Weltbank und Hilfsorganisationen unterzeichnet.

Von Anfang an – bereits in der Einleitung – verwechselt Lomborg Wälder mit Baumpflanzungen. Indem er eine WWF-Prognose über den Verlust des „natürlichen Reichtums“ kritisiert, unterstellt er, der einzige Wert von Wäldern läge in der Gewinnung von Nutzholz. Das ist, als würde man den Wert eines Computerchips nur nach seinem Siliziumgehalt bemessen. Der vom WWF benutzte Maßstab schließt hingegen natürliche Wälder ein (wegen ihres Artenreichtums) und Pflanzungen aus (wegen ihrer Artenarmut).

Die zentrale Frage des Buches lautet: Wendet sich alles zum Besseren? Sie ist wirklich wichtig. Tatsächlich wurden bei der Bekämpfung des sauren Regens inzwischen bedeutende Fortschritte erzielt, obwohl noch viel zu tun bleibt. Große Anstrengungen werden unternommen, die Zerstörung der Wälder zu bremsen und die Flutwelle des Artensterbens einzudämmen. Eines dürfen wir nicht vergessen: Entwaldung und saurer Regen sind im Prinzip umkehrbar – obwohl es eine Schwelle geben mag, nach deren Überschreiten keine Umkehr mehr möglich ist –, doch die Auslöschung einer Art ist unwiderruflich. Eine sachliche Analyse der Frage, wie weit wir gekommen sind und welcher Weg noch vor uns liegt, wäre eine große Leistung. Lomborg gibt vor, diese Analyse zu liefern, aber er verfälscht systematisch die Tatsachen.

Das lässt sich anhand Lomborgs selektiver Zitierweise belegen. Um zu zeigen, wie unmöglich das Bestimmen der Artensterberate sei, behauptet er: „Colinvaux gibt in Scientific American zu, dass die Rate ‚unkalkulierbar‘ ist.“ In Wahrheit schrieb Paul A. Colinvaux in seinem Artikel „Der Amazonas-Regenwald“ (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/1989, S. 70): „Denn dadurch, dass riesige Waldflächen von Menschenhand einfach vernichtet werden, verschwinden rasch so viele Tier- und Pflanzenarten, wie es bisher beispiellos ist. Die Folgen für die Zukunft sind nicht mehr kalkulierbar.“ Warum nicht zugeben, dass Colinvaux die Zahlen für immens hielt? Von manipulierenden Formulierungen wie „er gibt zu“ wimmelt es in dem Buch.

Außer von Voreingenommenheit strotzt das Werk auch von Flüchtigkeitsfehlern. Ein ums andere Mal habe ich versucht, den Weg vom laufenden Text zu den Fußnoten und weiter zum Literaturverzeichnis zu verfolgen, und fand nur eine Fata Morgana.

Noch viel schlimmer ist, dass Lomborg anscheinend keine Ahnung davon hat, wie die Umweltwissenschaften vorgehen: Forscher identifizieren ein mögliches Problem; verschiedene Hypothesen werden wissenschaftlich überprüft; daraus entsteht oft ein komplexeres Verständnis des Problems; die Forscher schlagen Maßnahmen zur Abhilfe vor – und erst dann bessert sich die Lage. Indem Lomborg willkürlich den ersten Schritt hervorhebt und gleich zum Endresultat springt, unterstellt er, alle Umweltforscher seien notorische Schwarzmaler. Der Punkt ist doch, dass sich die Dinge zum Besseren wenden, weil die Umweltforscher ein bestimmtes Problem anprangern, es wissenschaftlich untersuchen und Gegenmaßnahmen entwickeln. Leider scheint der Autor den Respekt nicht zu erwidern, den wir Biologen den Statistikern entgegenbringen.



FRANS LANTING / MINDEN PICTURES

Die Farben- und Formenvielfalt der Flora zählt für Lomborg nicht zum „natürlichen Reichtum“. Den Wert des Waldes sieht er in der Gewinnung von Nutzholz.

Thomas Lovejoy *ist Chefberater für Artenvielfalt des Präsidenten der Weltbank und leitender Berater des Präsidenten der United Nations Foundation. Von 1973 bis 1987 war er Direktor der amerikanischen Sektion des WWF (World Wide Fund for Nature) und von 1987 bis 1998 Sekretär für Umweltfragen und Äußere Angelegenheiten bei der Smithsonian Institution in Washington.*



Literaturhinweise

Apocalypse: No! Wie sich die menschlichen Lebensgrundlagen wirklich entwickeln. Von Björn Lomborg. Zu Klampen, Lüneburg 2002.

Die Zukunft des Lebens. Von Edward O. Wilson. Siedler, München 2002.

Bonner Luftnummer. Von Michael Springer. Spektrum der Wissenschaft 9/2001, S. 24.

Beyond Six Billion: Forecasting the World’s Population. Von John Bongaarts und Rodolfo A. Bulatao (Hgg.). National Research Council, 2000.

Global Biodiversity Assessment. Von V. H. Heywood (Hg.). Cambridge University Press, 1996.

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*

NANOTECHNOLOGIE

Eingewickelte Kohlenstoffdrähte

Kabel ohne Isolierung wären im Haushalt undenkbar – im Mikrokosmos der Nanomaschinen gab es bisher nichts anderes. Jetzt ist es Wissenschaftlern um John A. Gladysz an der Universität Erlangen gelungen, molekulare Drähte aus Kohlenstoff, die sie vor einem Jahr erstmals hergestellt hatten (SdW 9/2001, S. 26), mit speziell synthetisierten Molekülen wie mit einem Isolierband zu umwickeln. Dabei griffen sie auf das Prinzip der Selbstorganisation zurück. Als Isoliermaterial dienten lange Ketten aus Methylengruppen, Grundbausteinen von Fett und Paraffin, die beide nichtleitend sind. An die Enden dieser Ketten hängten die Forscher Phosphoratome. Auch die Kohlenstoffdrähte waren an den Enden besonders präpariert: Sie trugen als eine Art Anker Platinatome mit leicht austauschbaren, kurzen Seitenmolekülen (Liganden). Die Phosphoratome der Isolierketten verdrängten diese Liganden und hefteten sich selbst an das Platin, während die Ketten sich von alleine – per Selbstorganisation – um die Drähte wickelten. Das Ergebnis waren Kohlenstoffdrähte mit jeweils zwei isolierenden Methylensträngen, die sich spiralig um sie herum wanden. *(Angewandte Chemie, Bd. 114, S. 1951)*



UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG

Zwei spiralförmig angeordnete Methylenketten (rot) isolieren den Kohlenstoffdraht (weiß).

GEOLOGIE / KLIMA

Unterschätzte Katastrophe

Heiße Lava überflutete in riesigen Strömen große Teile Sibiriens und Treibhausgase erfüllten die Luft, als vor etwa 250 Millionen Jahren ein vulkanisches Inferno losbrach. Viele Wissenschaftler sehen in dieser Katastrophe die Ursache einer drastischen globalen Klimaänderung im ausgehenden Perm, die das schlimmste Massensterben der Erdgeschichte verursachte: Rund siebzig Prozent der Landlebewesen und bis zu neunzig Prozent der Meerestiere gingen zugrunde. Andere Forscher vermuten allerdings einen kilometergroßen Meteoriten, der auf der Erde einschlug, als Killer. Die zu kilometerdicken Basaltdecken erstarrten ehemaligen Lavafluten auf der sibirischen Plattform, die so genannten Trapps, bedecken heute eine Fläche von der Größe Europas. Wie nun ein britisch-russisches Forscherteam herausfand, hatten sie einst aber mindestens die doppelte Ausdehnung. Die Forscher stießen bei der Analyse von Bohrkernen aus dem Westsibirischen Becken auf Trappbasalt in tieferen Schichten. Er hatte dasselbe Alter und die gleiche chemische Zusammensetzung wie der weiter östlich liegende. Die neue Erkenntnis ist Wasser auf die Mühlen derjenigen, die in verheerendem Vulkanismus die Ursache der Klimakatastrophe am Ende des Perms sehen. *(Science, Bd. 296, S. 1846)*

ARCHÄOLOGIE

Kupferfabrik der Bronzezeit

Massenproduktion gab es schon vor rund 4800 Jahren – das belegt die größte Kupferfabrik der frühen Bronzezeit, die etwa fünfzig Kilometer südlich des toten Meeres im jordanischen Khirbat Hamra Ifdan entdeckt wurde. Zwar stürzte der Gebäudekomplex bei einem Erdbeben um 2700 v. Chr. ein, doch blieben in den rund siebzig Räumen, Gängen und Höfen hunderte Gussformen und tausende Werkzeuge, Metallobjekte und Produktionsabfälle in erstaunlich gutem Zustand erhalten. Mit Hilfe eines Geoinformationssystems konnte das internationale Team um den Archäologen Thomas Levy von der Universität von Kalifornien in San Diego erstmals alle Fertigungsschritte der Produktion von Kupferobjekten rekonstruieren und kartieren. Durch Isotopen-Analyse von Bleispuren ließ sich zudem das benutzte „Rezept“ samt „Zutatenliste“ ermitteln. Und schließlich konnten die Forscher anhand chemischer Analysen das weitgespannte Kupfer-Handelsnetz der damaligen Zeit aufdecken. Darin gab es außer Khirbat Hamra Ifdan nur ein einziges vergleichbares Industriezentrum im türkischen Kestrel. *(Antiquity, Bd. 76, S. 425)*



UCSD LEVANTINE ARCHAEOLOGY LAB

4800 Jahre alte Gussform für Kupferstäbe aus Khirbat Hamra Ifdan

BIOLOGIE

Minnesänger der Meere

Die Ozeane hallen wider von Tönen, über die Meeresbewohner miteinander kommunizieren, Beute orten oder navigieren. Wohl am lautesten tönt und am weitesten schallt der tiefe Gesang der Wale. Wozu er dient, ließ sich bisher nur vermuten. Jetzt haben Donald A. Kroll von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz und seine Kollegen dem Rätselraten ein Ende gesetzt. Mit Wassermikrofonen orteten sie Finnwale in der Loreto Bay im Golf von Kalifornien vor Mexiko, in der sich die Meeressäuger wegen der dichten Krillschwärme gern aufhalten, und bestimmten anhand einer Hautprobe das Geschlecht der Sänger. Interessantes Resultat: Nur Männchen senden die niederfrequenten Töne aus. Damit dürfte der Zweck klar sein: Die Sänger wollen mit ihrem Lied Weibchen anlocken und beeindrucken. Da Finnwale weit verstreut leben, sind Laute niedriger Frequenzen zur Verständigung besonders gut geeignet, da sie eine große Reichweite haben. Die Kommunikation wird aber durch den steigenden Hintergrundlärm, den technische Geräuschquellen verursachen, zunehmend erschwert. *(Nature, Bd. 417, doi: 10.1038/417809a)*



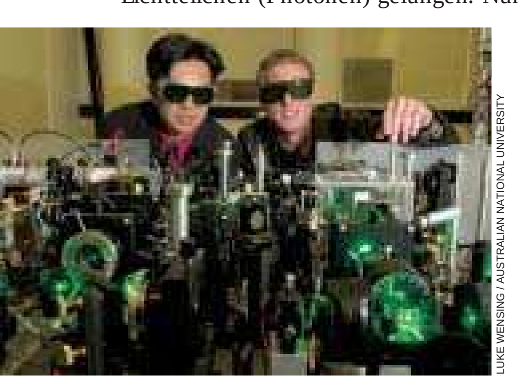
CHRISTOPHER W. CLARK, BIOACOUSTICS RESEARCH PROGRAM / CORNELL LAB OF ORNITHOLOGY

Mit ihrem Gesang locken männliche Finnwale Weibchen an.

PHYSIK

Teleportation eines Strahls

Reisen ohne Zeitverlust ist ein Traum, der nur Captain Kirk und seiner Crew vergönnt war. Die körperlose Übertragung eines makroskopischen Objekts an einen anderen Ort gehört bisher ins Reich der Science-Fiction. Im Mikrokosmos dagegen ist schon vor gut zwei Jahren die Teleportation von einzelnen Lichtteilchen (Photonen) gelungen. Nun hat ein Team um Ping Koy Lam von der Australischen Nationaluniversität in Canberra den nächsten großen Schritt geschafft: Es konnte einen ganzen Laserstrahl aus einer Milliarde Photonen verschwinden und einen Meter entfernt wieder auftauchen lassen. Grundlage all dieser Experimente bildet die so genannte Verschränkung. Dabei werden zwei Teilchen derart miteinander verbunden, dass der Zustand des einen den des anderen bestimmt, egal wie weit die beiden voneinander entfernt sind. Die Teleportation größerer Objekte erfordert das Kunststück, viele Teilchen auf diese subtile Weise miteinander zu koordinieren. (*Australian National University*)


LUKE WENSING / AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY

Der Teleporter in Aktion

MEDIZIN

Implantierbare künstliche Lunge

Ein Großteil der Patienten, die auf eine Lungentransplantation warten, stirbt an Lungenversagen, bevor ein passendes Spenderorgan gefunden ist. Eine künstliche Lunge könnte die Wartezeit in Zukunft überbrücken helfen. Robert Bartlett von der Universität von Michigan in Ann Arbor hat ein solches Organ entwickelt. Da es in den Körper implantierbar ist, kann der Patient mit ihm sogar das Krankenhaus verlassen. Das Ersatzorgan wird an die Lungenarterie angeschlossen. Den Blutfluss durch die Kunstlunge gewährleistet somit das Herz des Patienten, nicht eine Pumpe. Dies senkt das Risiko, dass sich gefährliche Blutklümpchen bilden. Winzige Poren von Hohlfasern übernehmen die Aufgabe der Lungenbläschen: Wie diese entziehen sie dem Blut das Kohlendioxid und bringen im Gegenzug Sauerstoff ein. Im Tierversuch hat sich das künstliche Organ bereits bewährt: Schafe konnten damit für eine Woche am Leben gehalten werden. *(University of Michigan)*


UNIVERSITY OF MICHIGAN

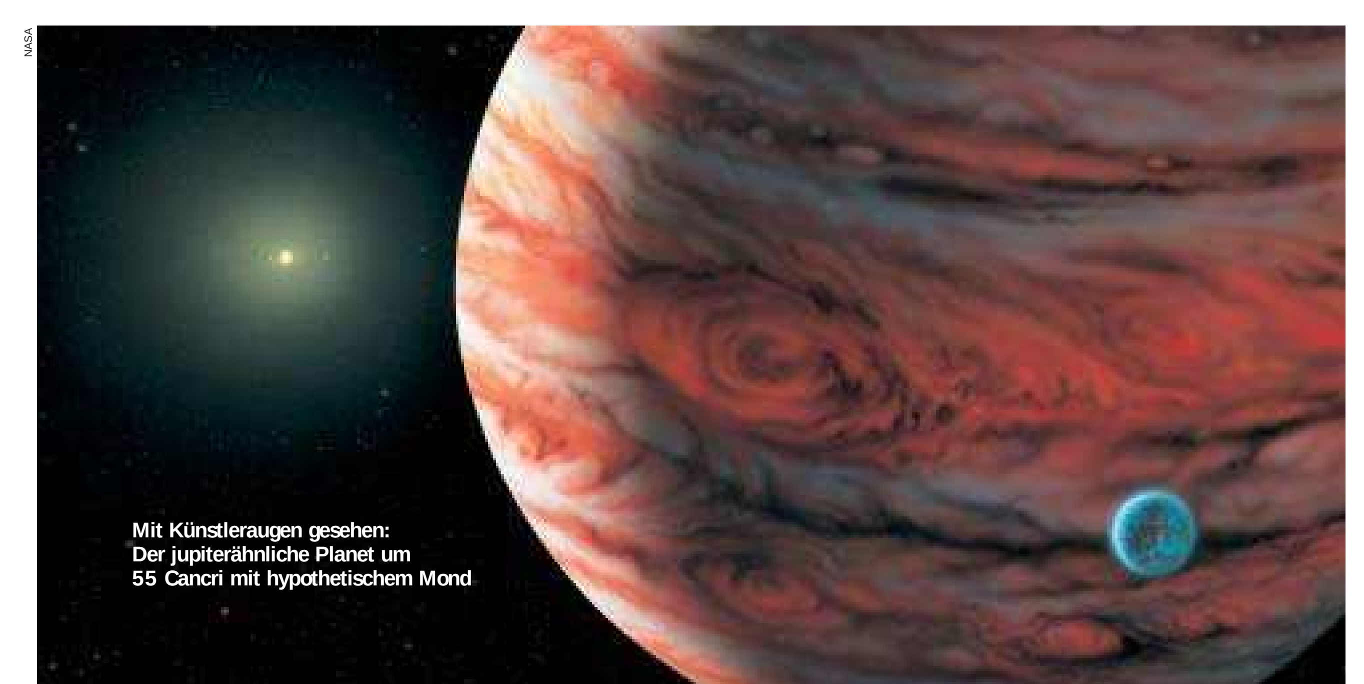
Die künstliche Lunge wird an den normalen Blutkreislauf angeschlossen.

ASTRONOMIE

Ferne Brüder des Jupiters

Extrasolare Planeten von der Größe des Jupiters kennt man inzwischen schon einige. Doch sie kreisen ausnahmslos viel näher und meist auf stark exzentrischen Orbits um ihre Sonnen. Nun wurden gleich zwei Gasriesen entdeckt, die dem Jupiter auch in den Bahnparametern ähneln. Auf den einen stieß ein Astronomenteam von der Universität von Kalifornien in Berkeley und der Carnegie Institution of Washington. Er folgt einer fast kreisrunden Bahn um den Stern 55 Cancri – und das in einer Entfernung, die nur knapp sechs Prozent größer ist als die des Jupiters von der Sonne. Auch für einen Umlauf braucht er ähnlich lange: 13 statt 11,86 Jahre. Allerdings hat der neue Planet eine 3,5- bis 5fach größere Masse als sein Gegenstück im Sonnensystem. Um 55 Cancri kreisen zudem in kurzer Distanz zwei weitere Gasriesen. Zwischen ihnen und dem jupiterähnlichen Planeten könnte nach theoretischen Berechnungen ein erdähnlicher Planet existieren. Einen noch perfekteren Doppelgänger des Jupiters hat Michel Mayor vom Genfer Observatorium entdeckt. Er beschreibt einen fast perfekten Kreis um den Stern HD 190360. Dabei ist sein Bahnradius nur geringfügig kleiner und seine Masse nur zehn Prozent größer als die des Jupiters. *(University of California in Berkeley/Science, Bd. 296, S. 2124).*

NASA



Mit Künstleraugen gesehen: Der jupiterähnliche Planet um 55 Cancri mit hypothetischem Mond

Der Kosmos im Gammalicht

Eine trickreiche Beobachtungstechnik ermöglicht es, die hochenergetische Gammastrahlung von Himmelsobjekten vom Erdboden aus zu erfassen und in Bilder dieser Quellen umzuwandeln. Damit wird der Astronomie ein neuartiges Fenster für Beobachtungen geöffnet.

Von Heinrich J. Völk und Stefan Gillessen

Langsam schiebt sich die gleißend helle Sonne hinter den markanten Gamsberg im Westen. Selbst wenige Minuten, bevor sie völlig unter den Horizont abtaucht, sind ihre Strahlen hier in Namibia für Mitteleuropäer ungewohnt stark. Die Luft über der in 1800 Meter Höhe liegenden Farm Göllschau ist heute wunderschön klar, und es ist wenige Tage vor Neumond. In einer Viertelstunde wird ein Sternenmeer vor dem tiefdunklen Himmelshintergrund erscheinen.

Die Astronomen, die hier arbeiten, haben jedoch keine Zeit, das atmosphärische Farbenspiel zu bestaunen. Vier Teleskope müssen sie betriebsbereit machen. Dazu wird jeder der großen sphärischen Spiegel, der jeweils in einer sechzig Tonnen schweren Stahlkonstruktion ruht, auf das zu beobachtende Himmelsobjekt ausgerichtet und Hochspannung an die Fotodetektoren gelegt. Kuppeln brauchen die Wissenschaftler indes nicht zu öffnen. Jede der über hundert Quadratmeter großen Spiegelflächen steht Tag und Nacht im Freien. Nur die Fotoröhren der Kameras sind durch einen Deckel vor dem Sonnenlicht geschützt. Diese Abdeckung dürfen die Beobachter nur in solch dunklen Nächten wie heute öffnen. Denn selbst der fahle Schein des Erdtrabanten würde die empfindlichen Sensoren zerstören.

Die hohe Empfindlichkeit ist notwendig, um die schwachen Lichtblitze in der Atmosphäre sehen zu können, nach denen die Astronomen suchen. Denn anders als ihre Kollegen, die mit herkömmlichen Teleskopen das sichtbare Licht von Sternen und anderen Himmelsobjekten einfangen, halten die Wissenschaftler hier in Namibia Ausschau nach anderen kosmischen Sendboten: nach Gammaquanten. Das sind hochenergetische Verwandte der sichtbaren Lichtquanten oder Photonen.

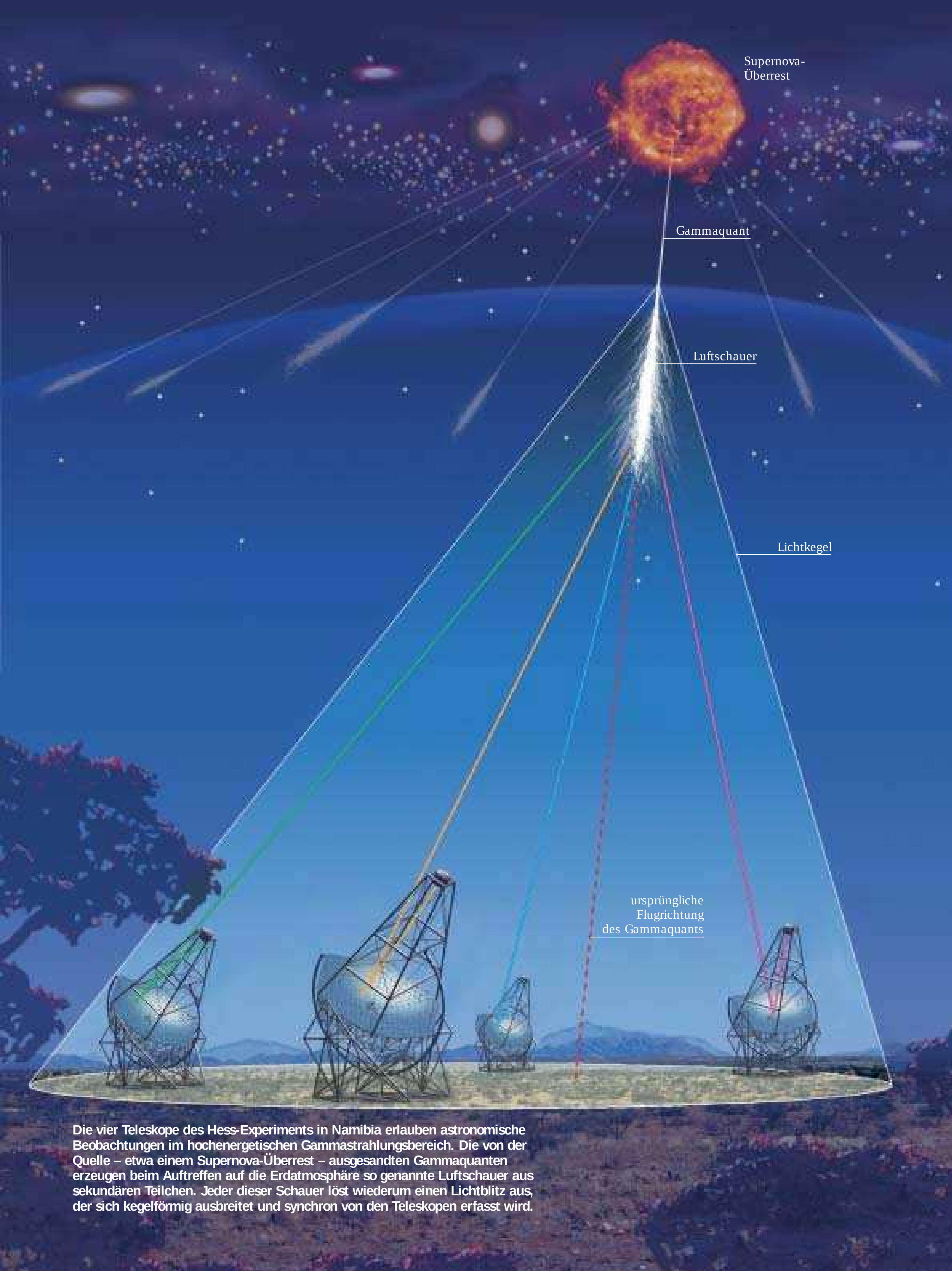
Allerdings können die Gammaquanten nicht direkt mit dem Teleskop registriert oder gar abgebildet werden, denn sie bleiben in der irdischen Lufthülle stecken. Wenn nämlich ein Gammaquant – oder ein materielles Teilchen hoher Energie wie etwa ein fast lichtschnelles Proton – auf die Moleküle in der Atmosphäre trifft, wird es zerstört und in einem kaskadenartigen Prozess in andere Partikel und Photonen umgewandelt. Doch dieser Luftschauer löst einen bläulichen Lichtblitz aus, der in rund acht Kilometer Höhe für wenige Nanosekunden aufleuchtet. Das ist das Signal der kosmischen Teilchen, das die Forscher vom Erdboden aus beobachten. Mit ihren Gammateleskopen gucken sie also im wahrsten Sinn des Wortes in die Luft.

Das Gammastrahlen-Observatorium, das hier im Khomas-Hochland von Namibia entsteht, öffnet den Astronomen gewissermaßen ein neues Fenster, durch das sie den Himmel in einem anderen Licht beobachten können. Die erste um- ▶

IN KÜRZE

➤ Anstelle von Licht, das leuchtende Himmelskörper aufgrund ihrer Temperatur aussenden, analysieren Gamma-Astronomen hochenergetische Strahlung, die von nicht-thermischen Vorgängen im Universum stammt. Stoßwellen oder fluktuierende Magnetfelder können geladene Teilchen beschleunigen – bis auf 10^{20} Elektronenvolt, was der Bewegungsenergie eines Fußballs beim Elfmeter entspricht. Die Teilchen wiederum erzeugen hochenergetische Gammaquanten.

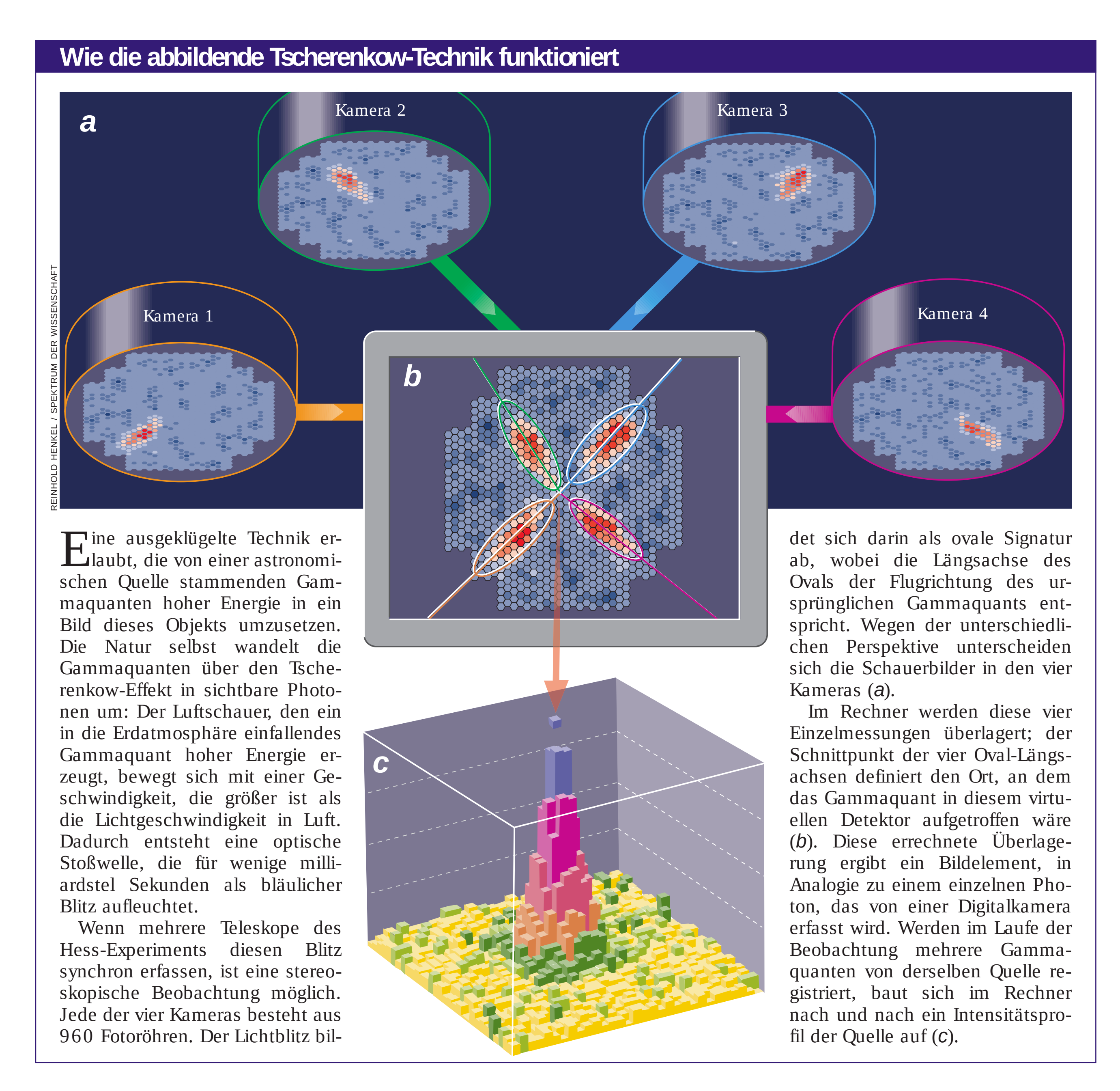
➤ Gammaquanten breiten sich wie gewöhnliches Licht geradlinig durchs All aus, enthalten also ebenfalls Informationen über Ort und Art ihrer Quelle. Ein Trick ermöglicht sogar eine abbildende Beobachtung: Die Gammaquanten erzeugen beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre Schauer aus schnellen Teilchen, die eine optische Stoßwelle aus bläulichem Licht aussenden. Durch stereoskopische Beobachtung und Aufsummieren solcher Lichtblitze können die Astronomen ein Bild der Quelle errechnen.



Die vier Teleskope des Hess-Experiments in Namibia erlauben astronomische Beobachtungen im hochenergetischen Gammastrahlungsbereich. Die von der Quelle – etwa einem Supernova-Überrest – ausgesandten Gammaquanten erzeugen beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre so genannte Luftschauer aus sekundären Teilchen. Jeder dieser Schauer löst wiederum einen Lichtblitz aus, der sich kegelförmig ausbreitet und synchron von den Teleskopen erfasst wird.

fassende Beobachtung des Himmels im extrem energiereichen Teil des elektromagnetischen Spektrums begann Anfang der 1990er Jahre mit dem Compton-Gammastrahlen-Observatorium, das neun Jahre lang die Erde umrundete und so von außerhalb der störenden Atmosphäre messen konnte (siehe „Gamma-Astronomie mit dem Compton-Observatorium“, Spektrum der Wissenschaft 2/1994, S. 64). Mit diesem Satelliten vermochten die Astronomen den Energiebereich von etwa 50 Kilo- bis 30 Gigaelektronenvolt zu erschließen. Gammaquanten solcher Energie haben Wellenlängen, die mit dem Durchmesser eines Protons vergleichbar oder sogar kleiner sind; folglich kann man sie eher als Teilchen denn als Lichtwelle auffassen. Für noch höhere Energien – etwa im Bereich von einem Teraelektronenvolt (10^{12} Elektronenvolt) können die Astronomen mittels eines Tricks dennoch wieder vom Erdboden messen: Die Sekundärteilchen in dem Luftschauer, den ein aus dem All einfallendes Gammaquant in der Atmosphäre auslöst, bewegen sich schneller, als es der Lichtgeschwindigkeit in Luft entspricht. Dabei entsteht ähnlich wie bei einem Überschallknall eine optische Stoßwelle, die sich in einem schmalen Kegel mit einem Öffnungswinkel von nur etwa einem Grad in Flugrichtung des einfallenden Gammaquants ausbreitet. Diese Stoßwelle ist es, die sich als blauer Lichtblitz bemerkbar macht. Nach dem russischen Physiker, der den Effekt 1934 entdeckte, wird diese sichtbare Stoßwelle Tscherenkow-Strahlung genannt.

Die Gamma-Astronomen nutzen also die Atmosphäre, die das irdische Leben vor der extrem energiereichen Strahlung aus dem Kosmos schützt, als riesigen Detektor für eben diese Strahlung. Der Abstand der vier Teleskope in Namibia ist gerade so gewählt, dass sie möglichst viel Atmosphäre gleichzeitig überwachen und dennoch die gleichen Schauer sehen können. Der schmale Kegel des Tscherenkow-Lichts ist am Erdboden etwa 250 Meter breit, und wenn die Flugbahn des einfallenden kosmischen Teilchens in das Areal zwischen den Teleskopen zielt, wird der Lichtkegel



Wie die abbildende Tscherenkow-Technik funktioniert

Eine ausgeklügelte Technik erlaubt, die von einer astronomischen Quelle stammenden Gammaquanten hoher Energie in ein Bild dieses Objekts umzusetzen. Die Natur selbst wandelt die Gammaquanten über den Tscherenkow-Effekt in sichtbare Photonen um: Der Luftschauer, den ein in die Erdatmosphäre einfallendes Gammaquant hoher Energie erzeugt, bewegt sich mit einer Geschwindigkeit, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in Luft. Dadurch entsteht eine optische Stoßwelle, die für wenige milliardstel Sekunden als bläulicher Blitz aufleuchtet.

Wenn mehrere Teleskope des Hess-Experiments diesen Blitz synchron erfassen, ist eine stereoskopische Beobachtung möglich. Jede der vier Kameras besteht aus 960 Fotoröhren. Der Lichtblitz bildet sich darin als ovale Signatur ab, wobei die Längsachse des Ovals der Flugrichtung des ursprünglichen Gammaquants entspricht. Wegen der unterschiedlichen Perspektive unterscheiden sich die Schauerbilder in den vier Kameras (*a*).

Im Rechner werden diese vier Einzelmessungen überlagert; der Schnittpunkt der vier Oval-Längsachsen definiert den Ort, an dem das Gammaquant in diesem virtuellen Detektor aufgetroffen wäre (*b*). Diese errechnete Überlagerung ergibt ein Bildelement, in Analogie zu einem einzelnen Photon, das von einer Digitalkamera erfasst wird. Werden im Laufe der Beobachtung mehrere Gammaquanten von derselben Quelle registriert, baut sich im Rechner nach und nach ein Intensitätsprofil der Quelle auf (*c*).

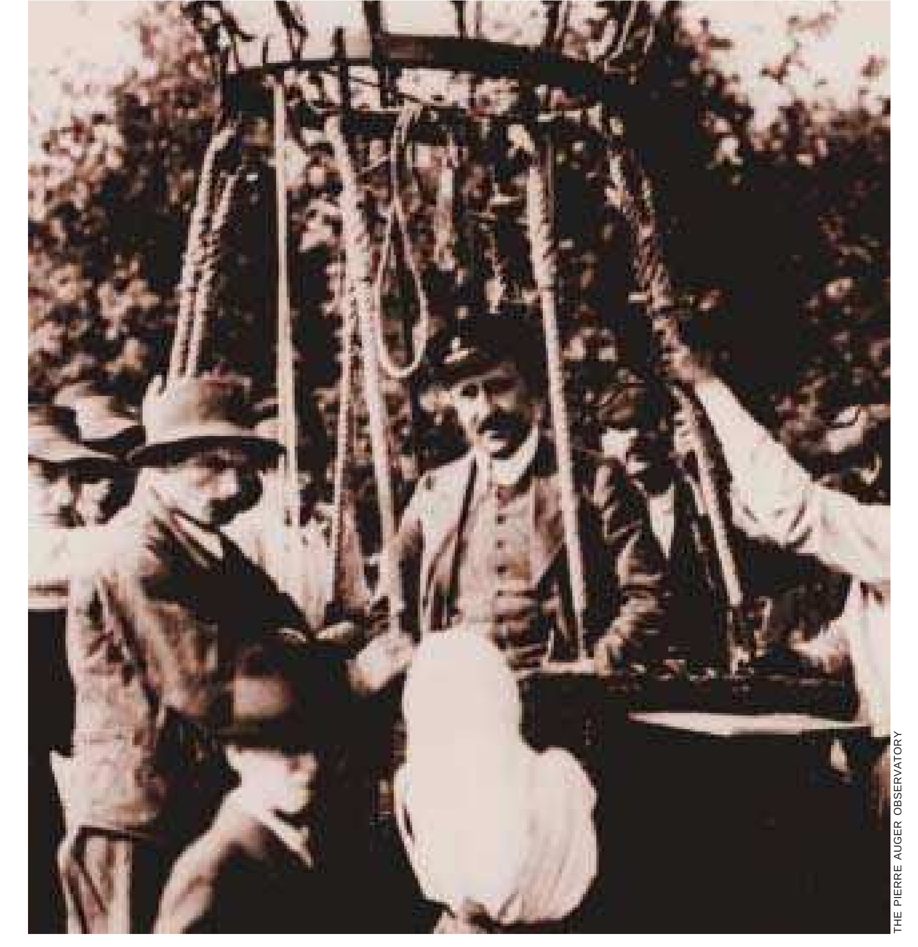
von bis zu vier Kameras erfasst. Jeder dieser elektronischen Detektoren besteht aus 960 Fotoröhren, in denen der Lichtblitz ein markantes Signal erzeugt. Aus den simultanen Schnappschüssen, welche die Kameras von jedem Schauer aufzeichnen, rekonstruiert ein Rechner dann ein räumliches Bild (siehe Kasten auf der linken Seite).

Dieses Bild informiert über das ursprünglich in die Atmosphäre eingedrungene Teilchen: Aus welcher Richtung kam es? Was war seine Energie? Was für ein Teilchen war es? Ein Gammaquant oder ein leichter Atomkern? Die Ankunftsrichtung des Primärteilchens lässt sich wegen der simultanen Beobachtung mit mehreren Teleskopen auf ein zehntel Grad genau angeben. Wenn der Mond eine Gammaquelle wäre, könnten die Astronomen problemlos unterscheiden, ob ein Teilchen vom linken oder vom rechten Mondrand stammt. Noch genauer geht es, wenn viele Teilchen von einer Punktquelle detektiert werden. Dann lässt sich deren Position sogar auf wenige Bogensekunden genau angeben.

Die Energie der Teilchen, die mit den Teleskopen über das Tscherenkow-Licht nachgewiesen werden können, beträgt zwischen 100 Giga- und 50 Teraelektronenvolt. Jedes trägt somit rund eine Billion Mal mehr Energie als ein Photon sichtbaren Lichts – dies entspricht etwa dem Verhältnis des gesamten Bundeshaushalts zum Preis eines Brötchens. Allerdings lässt sich diese Energie nur auf rund zehn Prozent genau bestimmen.

Auch die Teilchenart können die Wissenschaftler lediglich mit Einschränkungen ermitteln. Aber es gelingt, geladene Atomkerne von elektrisch neutralen Gammaquanten zu unterscheiden. Letztere sind für die Astronomen so interessant, weil sie sich wie gewöhnliches Licht im All geradlinig ausbreiten und deshalb ihre Ankunftsrichtung auf den Ort ihrer Entstehung zurückweist (siehe Bild Seite 54). Mit ihnen können die Astronomen also im Prinzip genauso sehen wie mit gewöhnlichem Licht.

Geladene Teilchen hingegen werden in den galaktischen Magnetfeldern abgelenkt und verraten bei ihrer Ankunft auf der Erde nichts über ihren Ursprungsort. Leider überwiegt diese Teilchenart bei weitem: Selbst im Falle einer starken Quelle ist nur etwa jedes tausendste kosmische Teilchen, das die Teleskope registrieren, ein Gammaquant. Rund hundert Schauer rekonstruiert das Teleskopsystem in jeder Sekunde, doch nur alle zehn Sekunden fängt es das Signal eines Gammaquants auf. Deshalb ist es entscheidend, aus dem Bombardement der kosmischen Strahlung die Gammaquanten herausfiltern zu können.


THE PIERRE AUGER OBSERVATORY

Der österreichische Physiker Victor Franz Hess (Bildmitte) wies vor neunzig Jahren in Experimenten mit Freiballons die hochenergetische kosmische Strahlung nach. Ihm zu Ehren trägt das Teleskopsystem in Namibia den Namen Hess.

Den Wissenschaftlern ist es in den letzten zwanzig Jahren gelungen, diesen höchstenergetischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums für astronomische Beobachtungen zu erschließen. Die abbildende Tscherenkow-Technik, mit der sich durch Aufsummieren einzelner Gammaquanten ein fotografisches Bild erzeugen lässt, erweist sich dabei als die geeignete Messmethode. Sie liegt allen vier Gamma-Observatorien zu Grunde, die zurzeit in Namibia, auf der Kanareninsel La Palma, in Australien und in den USA entstehen.

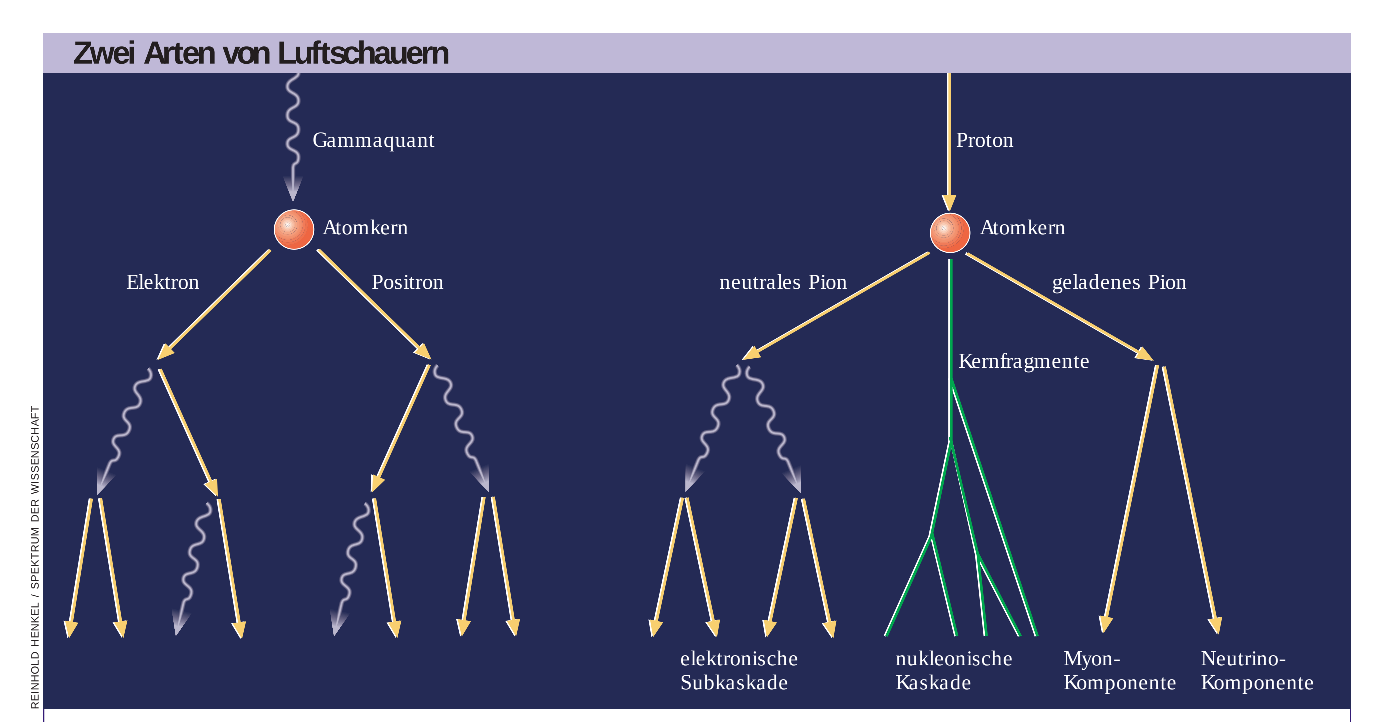
Was im Himmel bringt Teilchen auf fast Lichtgeschwindigkeit?

An zwei dieser Observatorien sind deutsche Forschungsinstitute maßgeblich beteiligt: Unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Physik in Garching entsteht auf dem Roque de los Muchachos auf La Palma das Magic-Teleskop (*Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Telescope*). Das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, an dem wir tätig sind, leitet den Bau des Hess-Experiments in Namibia, an dem sich 17 weitere Institute aus Europa, Armenien, Namibia und Südafrika beteiligen. Der Name steht für *High Energy Stereoscopic System* und ehrt zugleich den Entdecker der kosmischen Strahlung. Victor F. Hess (1883–1964), damals in Wien, interessierte sich ursprünglich für die Frage, ob und wie die natürliche Umgebungsradioaktivität mit der Höhe variiert. Dazu unternahm er um 1912 eine Reihe von Ballonflügen, von denen einer sogar bis in 5300 Meter Höhe führte. Zu seinem Erstaunen zeigten die Messgeräte oberhalb von 1500 Metern stets eine Zunahme der Radioaktivität, die nicht durch eine Strahlung irdischen Ursprungs zu erklären war.

Hess schloss deshalb auf eine „Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft, die von oben her in unsere Atmosphäre eindringt“. Für seine Entdeckung dieser später so genannten kosmischen Strahlung erhielt er 1936 den Nobelpreis für Physik. Seitdem haben viele Forscher die kosmische Strahlung untersucht. Demnach unterliegt die Erde beständig einem Bombardement hochenergetischer Atomkerne, die ihre Elektronenhülle verloren haben. Elektronen machen nur etwa ein Prozent des Teilchenflusses aus.

Die hochenergetischen Teilchen treffen völlig gleichmäßig aus allen Himmelsrichtungen auf die Atmosphäre. Ihre Energiedichte ist enorm: Sie ist im gesamten Milchstraßensystem etwa so hoch wie die des gewöhnlichen Sternen- ▶

Zwei Arten von Luftschauern



REINHOLD HENKEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Trifft ein Gammaquant auf die Erdatmosphäre, so zerfällt es im elektrischen Feld eines Atomkerns in ein Elektron-Positron-Paar (links). Die beiden neu entstandenen Teilchen können nun ihrerseits wieder hochenergetische Gammaquanten aussenden. So entsteht eine ganze Kaskade von Photonen und Elektronen, die sich fast mit Vakuumlichtgeschwindigkeit auf die Erde zubewegt. Ist das einfallende Teilchen ein hochenergetisches Proton, so reagiert es über die Kernkraft mit einem Atomkern in der Atmosphäre. In diesem Fall ist die entstehende Photon-Teilchen-Kaskade breiter und unregelmäßiger. In den Kameras der Tscherenkow-Teleskope ergibt sich demnach eine andere Signatur.

lichts. Erstaunlicherweise sind die Quellen dieser geladenen Strahlung experimentell noch nicht identifiziert.

Kein Objekt im Universum wäre heiß genug, um allein auf Grund seiner Temperatur Teilchen auf derart hohe Energien zu beschleunigen. Auch die spektrale Energieverteilung spricht eindeutig gegen einen thermischen Ursprung. Es gibt im Wesentlichen zwei Arten von Prozessen, bei denen die beteiligten Energievorräte für eine Beschleunigung auf fast Lichtgeschwindigkeit ausreichen würden: Explosionen von Sternen (so genannte Supernovae) und der Einfall von Materie auf kompakte Objekte, beispielsweise auf massereiche Schwarze Löcher, wie sie anscheinend in den Zentren fast aller Galaxien vorhanden sind.

Die von Supernovae beschleunigten geladenen Teilchen können sich im Milchstraßensystem ausbreiten und die Erde treffen. Im Falle der Massenakkretion auf ein riesiges Schwarzes Loch erfüllen die Teilchen zwar ihre Muttergalaxien, aber wohl nur die energiereichsten von ihnen können sich in anderen Sternsystemen wie etwa dem unsrigen bemerkbar machen. So vermuten die Astronomen, dass die Teilchen mit Energien oberhalb von etwa 10^{18} Elektronenvolt extragalaktischen Ursprungs sind. In beiden Arten von kosmischen Beschleunigern sollten durch Kollisionen der schnellen Atomkerne auch neutrale Pionen entstehen. Diese Partikel zerfallen in Gammaquanten, die uns dann auf geradem Weg erreichen. Die Gammastrahlung im Teraelektronenvolt-Bereich ist demnach ein Nebenprodukt in den Quellen der kosmischen Strahlung, und für beide Quellentypen haben Tscherenkow-Teleskope Beispiele am Himmel gefunden. Allerdings ist es nicht ohne weiteres zulässig, von beobachteter Gammastrahlung auf die Beschleunigung von Atomkernen zurückzuschließen.

Magnetfelder als Tennisschläger

Gammaquanten können auch in astrophysikalischen Prozessen entstehen, die nur Elektronen auf hohe Geschwindigkeiten bringen. Die Herkunftsart ist allein über die Form des Gammaspektrums zu ermitteln, steht aber experimentell noch aus. Als Elektronen-Beschleuniger scheinen zum Beispiel die Nebel um Pulsare zu wirken. Das sind Überreste der bereits erwähnten Sternexplosionen: Wenn ein massereicher Stern am Ende seines Daseins instabil wird, stürzt sein Innenbereich zu einem kompakten Neutronenstern von nur etwa zwanzig Kilometer Durchmesser oder gar zu einem Schwarzen Loch zusammen. Die explosionsartig freigesetzte Gravitationsenergie treibt die äußeren Schichten des Sterns in den interstellaren Raum hinaus. Solche Supernova-Explosionen ereignen sich im Mittel alle dreißig bis hundert Jahre in unserem Milchstraßensystem und bilden in ihrer Summe die größte Energiequelle für energiereiche Teilchen.

Trotzdem ist es nicht unbedingt der Explosionsvorgang selbst, der den Teilchen ihre Energie erteilt. Denn in diesem Falle würde die Partikelenergie durch die Temperatur der Explosionswolke bestimmt. Doch weder die hohe Anzahl an Teilchen noch die Form ihrer Energieverteilung kann so erklärt werden. Es müssen also zusätzliche, nicht-thermische Prozesse beteiligt sein.

Dabei muss man sich vorstellen, dass einzelne geladene Teilchen mit weit schwereren Objekten, die sich ihrerseits bewegen, zusammenprallen und an ihnen reflektiert werden. Das Ganze ähnelt einer Art Tennisspiel – jedoch mit einem wesentlichen Unterschied: Wenn ein fünfzig Gramm schwerer, wuchtig geschlagener Ball ankommt, kann ihn ein Spieler mit dem Schläger, der zwar rund ein Kilogramm wiegt, sich aber nur mit etwa zwanzig Kilometern pro Stunde bewegt, nicht mehr annähernd so stark beschleunigen wie einen langsamer ankommenden Ball. Die Geschwindigkeiten von Tennisbällen überschreiten des- ▶

BILD OBEN: GERMAN HERMANN, BILDER MITTE: FRANCOIS TOUSSENEL, BILD UNTEN: MICHAEL PUNCH



Das erste der vier Tscherenkow-Teleskope des Hess-Experiments wurde im Juni 2002 fertig gestellt. Der Hauptspiegel ist aus mehreren Segmenten aufgebaut (oben). In der Schutzhütte installierten französische und namibische Ingenieure die Kamera, die aus 960 einzelnen Fotoröhren besteht (links). Anschließend wurde das pneumatische Öffnen und Schließen des Deckels getestet (rechts). Das Teleskop ist nun betriebsbereit (unten).

halb praktisch nie 200 Kilometer pro Stunde. Dann nämlich sind der Impuls des Balls und derjenige des Schlägers vergleichbar groß.

Im Kosmos hingegen übernehmen Magnetfelder die Rolle der Tennisschläger. Als Ganzes bewegte Teile kosmischer Gaswolken können so massereich und ausgedehnt sein, dass sie einen einzelnen Atomkern enormer Energie im Magnetfeld der Wolke zur Umkehr zwingen. Dabei bewegen sie sich für kosmische Verhältnisse oft nur langsam mit etwa 50 Kilometern pro Sekunde – also nur wenig schneller als die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne. In den Fluktuationen des Magnetfeldes erleidet das Teilchen einen sanften Stoß, durch den sein Impuls um etwa ein zehntel Promille erhöht wird. Aber im Gegensatz zum Tennisspiel kann sich dieser Vorgang fast beliebig oft wiederholen, solange nur der Krümmungsradius der Teilchenbahn in die Wolke passt.

In dieser Weise können auch die mit ungeheurer Wucht – mit rund 10 000 Kilometer pro Sekunde – auseinander fliegenden Explosionsschwaden einer Supernova Energie auf einzelne Teilchen übertragen. Ein Beispiel für einen solchen kosmischen Teilchenbeschleuniger ist Cassiopeia A, der Überrest der jüngsten bekannten Supernova in unserer Galaxis aus der Zeit um 1680. Diese Explosionswolke hat mittlerweile einen Durchmesser von 16 Lichtjahren.

Im Jahr 1999 hat das Vorgängerexperiment zu Hess, die Detektoranlage Hegra auf La Palma, Cassiopeia A als Gammaquelle im Teraelektronenvolt-Bereich identifiziert. Dieser Nachweis erforderte mehr als 200 Stunden Beobachtungszeit. Um nach allgemeinem Standard der Wissenschaft als Entdeckung akzeptiert zu werden, muss die Gammaquelle allerdings noch von einer unabhängigen Gruppe bestätigt werden.

Wenngleich Cassiopeia A im Prinzip die Vorstellung von den Beschleunigungsmechanismen bestätigt, ist diese Quelle doch komplizierter als andere. Denn der Vorläuferstern hatte in komplexer Folge Masse abgestoßen. Wesentlich einfachere Objekte dieser Art sind SN 1006 im Sternbild Lupus (Wolf) am Südhimmel und die von dem dänischen Astronomen Tycho Brahe beschriebene Supernova von 1572, ebenfalls im Sternbild Cassiopeia. SN 1006 wurde von japanischen und australischen Wissenschaftlern im Gammastrahlungsbereich beobachtet. Tychos Supernova-Überrest konnte trotz intensiver Suche bisher nicht im Gammastrahlungsbereich gefunden werden.

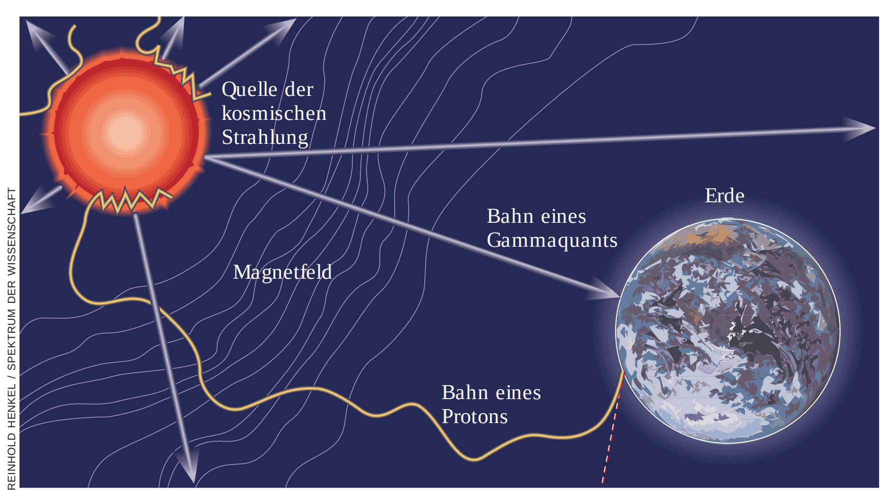
Aktive Galaxienkerne sind die größten Teilchenschleudern

Ein weiteres Beispiel für einen kosmischen Teilchenbeschleuniger ist der Krebs-Nebel im Sternbild Stier. Dieses Himmelsobjekt ist der Überrest einer Supernova-Explosion im Jahre 1054. Hier stellte sich heraus, dass die Wirklichkeit verwickelter sein kann als bisher beschrieben. Vom Krebs-Nebel erhalten wir zwar Gammastrahlung, insbesondere im Teraelektronenvolt-Bereich. Aber die Strahlung kommt aus der Zentralregion und hat mit der Explosionswolke nur indirekt zu tun. Im Zentrum der Explosion ist ein rotierender Neutronenstern übrig geblieben, der durch seine periodische Radioemission als Pulsar beobachtet werden kann. Er sendet einen Wind aus, der beim Aufprall auf das Innere der Explosionswolke eine Stoßwelle erzeugt, in der sehr effektiv Teilchen beschleunigt werden. Gleichwohl ist der Krebs-Nebel wegen seiner sehr starken nicht-thermischen Emission vom Radio- bis zum Gammastrahlungsbereich ein berühmtes Objekt. Die Gamma-Astronomen der Nordhalbkugel nutzen es sogar, um ihre Messgeräte zu kalibrieren.

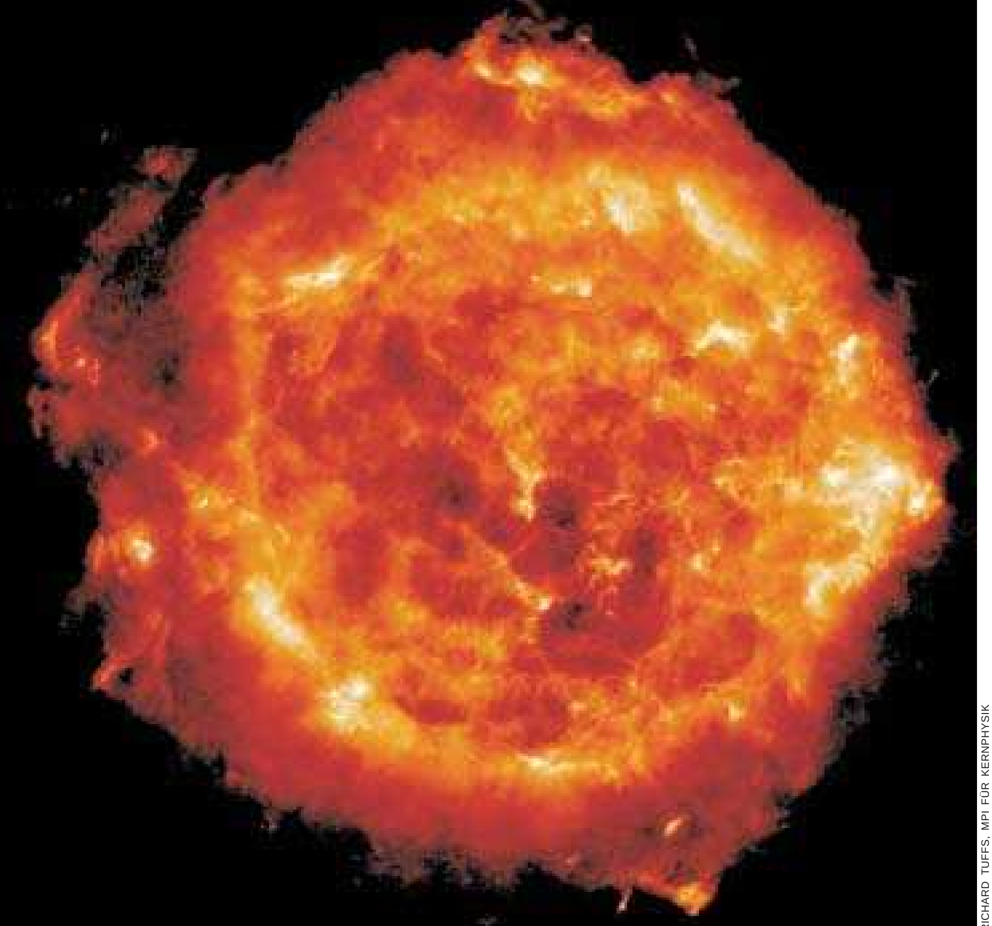
Noch ist also nicht gewiss, ob tatsächlich Supernova-Explosionen allein die kosmische Strahlung erzeugen. In einem globalen Sinne würde sich diese Hypothese testen lassen, wenn die Astronomen so genannte Starburst-Galaxien näher untersuchten. Das sind Galaxien, in denen Sterne mit einer weit höheren Rate entstehen als in unserem Milchstraßensystem und in denen folglich auch mehr Supernovae explodieren. Man erwartet deshalb eine erhöhte Gammstrahlungs-Emission dieser Galaxien. Eine Bestätigung der Supernova-Hypothese würde zudem empirisch belegen, dass die kosmische Strahlung ein wahrhaft universelles Phänomen ist – was wir im Moment nur vermuten können.

Man kennt bisher nur wenige Quellen von Teraelektronenvolt-Gammastrahlung außerhalb unseres Milchstraßensystems. Vier von ihnen sind von mehr als einer wissenschaftlichen Forschungsgruppe beobachtet worden und gelten deshalb als gesichert: Markarian 421, Markarian 501, 1ES1959 und H1426 +428, so die wenig glanzvollen Namen der kosmischen Energieschleudern. Bei allen vieren handelt es sich um Blazare, also um aktive Kerne von Galaxien. Die Emission der Strahlung fluktuiert sehr stark. Längere Phasen relativer Ruhe wechseln sich chaotisch mit kürzeren Strahlungsausbrüchen ab, in denen der Galaxienkern bis zu zehnmal heller scheint als der Krebs-Nebel.

Die Gamma-Helligkeit kann sich sogar in weniger als einer Stunde verdoppeln oder halbieren. Das schränkt die Größe der emittierenden Region auf unter eine Lichtstunde ein – das ist weniger als der Durchmesser der Saturnbahn. Beliebtestes Modell für aktive Galaxienkerne ist ein massereiches Schwarzes Loch im Zentrum der Muttergalaxie, das in seiner Äquatorebene einströmende Materie in einer Akkretionsscheibe sammelt und längs seiner Drehachse einen Materiestrom herausschleudert (siehe Bild auf Seite 56). Je nachdem, unter welchem Winkel man auf die Akkretionsscheibe um den Ereignishorizont blickt, wird das Objekt verschieden klassifiziert. Wenn der senkrecht zur Scheibe ausströmende Jet auf das Sonnensystem gerichtet ist,



Die in der Quelle sukzessive beschleunigten geladenen Teilchen wie etwa Protonen werden im galaktischen Magnetfeld abgelenkt; ihre Ankunftsrichtung auf der Erde verrät nichts über ihren Ursprung. Neutrale Gammaquanten breiten sich hingegen ungestört aus und zeigen für einen Beobachter auf der Erde auf die Quelle zurück.



Explosionswolken von Supernovae – wie Cassiopeia A (links) und der Krebs-Nebel (unten) – sind starke Quellen hochenergetischer Gammastrahlung.



RICHARD TUFFS, MPI FÜR KERNPHYSIK
EUROPÄISCHE SÜDSTERNWARTE ESO

sieht man das Objekt als Blazar. Dann ist es am leichtesten zu beobachten. In der einfachsten Vorstellung wirken auch im Jet Stoßwellen als Beschleuniger: Schnellere, von hinten kommende Teile des Jets können auf langsameres Material weiter außen auflaufen und es schockartig komprimieren.

Die relativistische, also fast lichtschnelle Bewegung des Materiejets auf die Erde zu führt infolge des Doppler-Effekts dazu, dass die elektromagnetische Strahlung aus dem Jet extrem zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben wird. Zusätzlich wird die emittierte Strahlung wegen der relativistischen Geschwindigkeit des Jets stark nach vorne gebündelt, was ihre scheinbare Intensität um ein Vielfaches verstärkt. In diesem Bild kann man die starke Variabilität der Quelle sowohl durch geringe Schwankungen der Jetrichtung als auch durch einen veränderten Materiefluss im Jet erklären. Auch Beobachtungen in anderen Spektralbereichen weisen darauf hin, dass die Strahlung aus dem Jet stammt.

Im Röntgenbereich beispielsweise beobachtet man starke und energiereiche Synchrotonstrahlung, die im Rhythmus der Gammastrahlung fluktuiert. Dies ist ein verlässliches Indiz dafür, dass zumindest Elektronen auf ultrarelativistische Energien beschleunigt werden. Solche Elektronen können relativ niederenergetische Photonen auf Energien im Teraelektronenvolt-Bereich stoßen.

Erstaunlicherweise können Teraelektronenvolt-Photonen keineswegs selbstverständlich kosmische Distanzen überwinden. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie unterwegs im extragalaktischen Raum absorbiert werden, ist recht hoch. Denn der Raum ist für Gammaquanten keineswegs durchsichtig. Vielmehr führt das diffuse Strahlungsfeld aus gewöhnlichen Photonen dazu, dass sie quasi durch dunklen Rauch fliegen. Vor allem Licht des nahen Infrarots – mit Wellenlängen im Mikrometerbereich – absorbiert die Teraelektronenvolt-Gammaquanten sehr effektiv. Diese werden dabei jeweils in ein Elektron und in dessen Antiteilchen, ein Positron, umgewandelt.

Undurchsichtiges Universum

Wie stark die Teraelektronenvolt-Gammastrahlung absorbiert wird, hängt außer von der nur vage bekannten Intensität des Strahlungsfeldes selbstverständlich auch vom Abstand zwischen Quelle und Erde ab. Ganz ähnlich, wie man im Nebel nahe Objekte noch gut erkennen kann und erst fernere im Dunst verschwinden, so sollten die im Teraelektronenvolt-Bereich beobachteten Gammaquellen mit zunehmendem Abstand immer schwächer und seltener werden.

Der Effekt kommt vermutlich bereits bei Distanzen von einigen hundert Millionen Lichtjahren zum Tragen. Denn nach den heute üblichen Modellen des Strahlungsfeldes ist von der ursprünglichen Zahl an Teraelektronenvolt-Photonen nach etwa 500 Millionen Lichtjahren nur noch die Hälfte übrig. Kosmologisch gesehen kann man mit diesen hochenergetischen Gammaquanten nicht weit sehen: Das Universum wird undurchsichtig wie eine dichte Nebelwand. Dementsprechend ist es unklar, ob die beobachteten Gammaspektren relativ naher Quellen wie Markarian 421 oder Markarian 501, die um die 500 Millionen Lichtjahre entfernt sind, bereits durch Absorption merklich beeinflusst sind. Für die Quelle H1426+428, die etwa viermal so weit entfernt ist, erwarten die Gamma-Astronomen auf jeden Fall eine Verfälschung durch den diffusen extragalaktischen Strahlungshintergrund. Die tatsächliche Leuchtkraft von H1426+428 im Teraelektronenvolt-Bereich ist deshalb wohl rund hundertfach höher, als es die direkte Messung glauben lässt.

Da außerdem das Strahlungsfeld dem Energiespektrum der Gammastrahlung eine spezifische Signatur aufprägt, ergibt sich so umgekehrt eine Methode, das Strahlungsfeld mit Hilfe der Gamma-Astronomie zu bestimmen. Solche Untersuchungen werden künftig gemeinsam mit direkten Messungen des Hintergrundlichts wichtige Aussagen über die Geschichte der Sternentstehung im Universum erlauben.

Mit zunehmender Energie der Gammaquanten sollte die Absorption stärker werden. Eine Gammaquelle, die vor al- ▶



Kerne aktiver Galaxien schleudern längs ihrer Drehachse Materieströme ins All. Diese Jets bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit und sind eine weitere Quelle für Gammastrahlen höchster Energie.

lem bei Energien oberhalb von zehn Teraelektronenvolt emittiert, wird man im direkten Licht dieser Gammaquanten also selbst auf kurze kosmische Distanzen nicht mehr sehen können. Andererseits geht die Energie der Gammaquanten weitestgehend in Bewegungsenergie der erzeugten Elektron-Positron-Paare über und ist deshalb nicht verloren. Die entstandenen hochenergetischen geladenen Teilchen befinden sich dabei in dem Magnetfeld des intergalaktischen Raums und werden von ihm in alle Richtungen abgelenkt. Darüber hinaus können auch sie mit Photonen des diffusen Strahlungsfeldes in Wechselwirkung treten und sie auf Energien im Gammastrahlungsbereich stoßen.

Die so entstandenen sekundären Gammaquanten können den gleichen Zyklus wiederholen. Daraus resultiert eine Kaskade von Gammaquanten immer niedrigerer Energie. Weil mit abnehmender Energie auch die Absorption nachlässt, wird das Universum für die Gammaquanten schließlich durchsichtig. Dann ist um die ursprüngliche Quelle ein kugelförmiger Halo aus niederenergetischem Gammalicht zu sehen. Deshalb sollten wir nicht nur die Strahlung der Blazare registrieren können, die direkt auf uns zukommt, sondern durch die Halos auch Quellen, deren Jet in beliebige Richtungen weist. Der Durchmesser des Halos ist durch den Ablauf der Paarbildung und die Intensität des diffusen intergalaktischen Strahlungsfeldes bei dieser Entfernung bestimmt. Wenn wir diese Intensität kennen und den Winkeldurchmesser des Halos messen, können wir den Abstand der Gammaquelle in absoluten Einheiten berechnen. Dieses Verfahren wäre eines der wenigen, mit denen die Astronomen Entfernungen über extragalaktische Distanzen hinweg bestimmen können.

Falls es gelänge, nicht nur den Durchmesser des Halos, sondern auch seine radiale und spektrale Intensitätsverteilung im Gammastrahlungsbereich zu messen, ließe sich gewissermaßen ein genaues Schnittbild der Quelle anfertigen. Daraus ergäben sich dann Hinweise auf die zeitliche Entwicklung des Strahlungsfeldes als Folge der Evolution der Galaxien im Universum. Wir werden sehen, inwieweit die Hess-Teleskope oder ihre Weiterentwicklungen diese theoretischen Versprechungen durch empirische Befunde einlösen können.

Ein weiteres Studienobjekt für die Gamma-Astronomie sind die größten gravitativ gebundenen Objekte des Universums, die Galaxienhaufen. In ihnen kreisen bis zu tausend Sternsysteme um ein gemeinsames Gravitationszentrum. Sie enthalten aber auch außerordentlich viel Gas sehr hoher Temperatur – bis zu hundert Millionen Grad heiß –, das vornehmlich im Röntgenlicht beobachtet wird. Bei der Entstehung von Galaxienhaufen, die bis heute andauert, müssen enorm energiereiche Prozesse abgelaufen sein. Dabei ist gleichzeitig mit dem heißen Gas eine nicht-thermische Gaskomponente erzeugt worden, analog zu dem, was wir in der Umgebung der Erde als kosmische Strahlung registrieren. Der Nachweis dieser nicht-thermischen Komponente mit Energien im Teraelektronenvolt-Bereich steht zwar noch aus. Wir erwarten aber, dass ihre Dichte außerordentlich hoch ist. Sie sollte mehr Energie enthalten als die thermische Energie aller Sterne in allen Galaxien des Haufens zusammengenommen. Für das Hess-Teleskopsystem sind deshalb eine Reihe von Galaxienhaufen im Beobachtungsprogramm vorgesehen.

Heute jedoch ist dazu keine Zeit mehr, dann bald geht der Mond auf. Für die Beobachter heißt das: Kameradeckel zu und Hochspannung aus. Die 960 Fotoröhren sind der Augapfel des Teleskops, der wohl gehütet sein will. Schließlich soll das Hess-Experiment noch viele Entdeckungen im Gammalicht machen. Die Tscherenkow-Astronomie ist noch jung. ■




Heinrich J. Völk *(links) ist Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Sein Forschungsinteresse gilt der Hochenergie- und der Infrarot-Astrophysik. Der Diplomphysiker* ***Stefan Gillessen*** *erstellt im Rahmen des Hess-Projekts in der Arbeitsgruppe von Völk seine Doktorarbeit. Er forscht insbesondere über galaktische Gammaquellen.*

Literaturhinweise

Das Compton-Gammastrahlen-Observatorium. Bilanz nach neunjähriger Mission. Von Volker Schönfelder in: Sterne und Weltraum, Bd. 41, Heft 7, S. 34 (Juli 2002).

Schwerpunkt Astroteilchenphysik in: Physikalische Blätter Bd. 56, Heft 3, (März 2000).

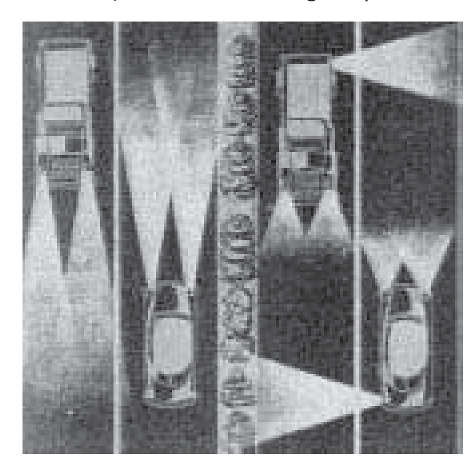
Gamma-Astronomie mit abbildenden Cherenkov-Teleskopen, Teil 1 und 2. Von Heinz Völk in: Sterne und Weltraum, Bd. 38, Heft 11, S. 948 und Heft 12, S. 1064 (1999).

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*



Lösung der Blendungsfrage im Kraftverkehr

Die Erfahrung lehrt, daß auf dunkler Landstraße sich begegnende Kraftfahrzeuge möglichst lange mit Fernlicht fahren, im letzten Augenblick abblenden und alsdann in ein „dunkles Loch“ hineinfahren (linker Teil des Bildes). Nach dem Wiederaufblenden sehen sich die Fahrer dann mitunter auf kürzeste Entfernung einem Hindernis … gegenüber. Fr. Lauk schlägt deshalb vor, an der Hinterseite jedes Wagens einen zusätzlichen weitstreuenden Scheinwerfer so anzubringen, daß er die Fahrbahn links vom Wagen (rechter Bildteil) ausleuchtet. Der Scheinwerfer soll sich selbsttätig einschalten, wenn die vorderen Scheinwerfer von Fernlicht auf Abblendung umgeschaltet werden. *(Die Umschau, 52. Jg., Heft 16, S. 507, 1952)*



Seitenscheinwerfer leuchten für entgegenkommende Fahrzeuge.

Ladung der Luft bei Schönwetter

Das luftelektrische Feld schwankt in besiedelten Gegenden bei Schönwetter mehr oder weniger stark. … Als Quellen für Raumladungen wurden bisher erkannt: Rauch aus Schornsteinen beim Anheizen oder Nachlegen ist positiv, während ein ruhig brennendes Feuer nur die Leitfähigkeit stark vermindert; Auto-Auspuffgase beim Anlassen des Motors negativ, beim Lauf positiv; Lokomotivdampf ist positiv. Negative Raumladungen sind in den Abgasen chemischer Betriebe z. B. von Gießereien, chemischen Instituten und vom Gaswerk. … Definierte Raumladungen in der Atmosphäre, z. B. von Lokomotivdampf, konnten noch nach 1 Std gut verfolgt werden. Die Lebensdauer beträgt sicher mehrere Stunden. *(Die Naturwissenschaften, 39. Jg., Heft 16, S. 376, 1952)*

Funkverbindung über den Mond

Erstmalig gelang es kürzlich, eine Funkverbindung … unter Benutzung der Mondoberfläche als Reflektor herzustellen. Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger betrug 1600 km, die Arbeitsfrequenz 418 MHz bei einer Antennenleistung von 20 kW. Während die Sendeantenne fest aufgebaut war, konnte man die Parabolspiegelantenne des Empfängers nachführen. Der Empfang setzte ein, sobald die Mondscheibe in den Strahlungskegel des Senders eintrat. … Nach insgesamt 30 Minuten riß die Verbindung ab, weil der Mond den Strahlungskegel verlassen hatte. *(Die Umschau, 52. Jg., Heft 16, S. 483, 1952)*

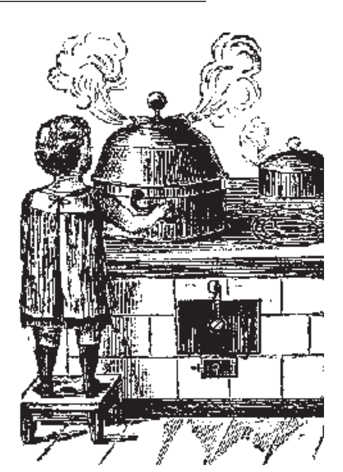


Die Liftkrankheit

Eine nicht unerhebliche Rolle in der Geschichte der Krankheiten wird wahrscheinlich der Aufzug spielen … Wer eine solche Einrichtung ständig benützt, stumpft freilich dagegen ab, aber die wiederholte Bewegung des Körpers, vornehmlich der Einfluß auf die Eingeweide des Unterleibes, vermag eine Erkrankung zu erzeugen. Die im Aufzug erhaltenen Stöße wirken … entweder auf den Magen oder auf den Kopf und haben Schwindel, Kopfschmerzen, Erbrechen und oftmals Aussetzen der Herzthätigkeit zur Folge. Personen mit schwachem Magen oder Herzen ist von der Beförderung mit dem Aufzug geradezu abzurathen. *(Stein der Weisen, Bd. 28, S. 247, 1902)*

Dampfwaschmaschine für den Hausgebrauch

Die hier abgebildete Waschmaschine verrichtet die Arbeit des Waschens in dem vierten Teil der Zeit und eignet sich sowohl zum Waschen der gröbsten, wie auch der feinsten Wäsche. Um die Dampfwaschmaschine … zur Reinigung von Wäsche zu benutzen, wird der Kessel bis zu einem Drittel mit kaltem Wasser angesetzt. Dem Wasser wird vorher etwas Soda beigefügt. Die Wäsche wird, wie üblich, eingeseift und aufgelockert in die Trommel gelegt. Man lässt das Wasser dann nahezu bis zum Sieden erwärmen und dreht die Kurbel langsam etwa eine Viertelstunde lang. Durch den sich entwickelnden Dampf wird der Schmutz aus der Wäsche infolge der Ausspülung durch das heisse Wasser vollständig gelöst und entfernt. Die Bethätigung der Kurbel zur Drehung der mit Wäsche gefüllten Trommel erfordert keinerlei Übung und nur sehr geringe Kraft. *(Die Umschau, VI. Jg., No. 34, S. 678, 1902)*



Dampfwaschmaschine im Gebrauch

Die nicht zu unterschätzende Düngetätigkeit des Regenwurms

Ein Schweizer Naturforscher sammelte … eine bestimmte Anzahl von Regenwürmern, denen er als Wohnsitz eine mit Gartenerde gefüllte Kiste anwies, und machte durch einige Zeit die Analyse der Auswurfsstoffe, welche die Regenwürmer auf der Oberfläche deponieren. Er stellte fest, dass jene Portion Erde, welche den Verdauungskanal des Wurms passiert hatte, wesentlich mehr den Charakter des Humus zeigte, als die unberührt gebliebene … Auch die Nitrifikation der organischen Substanzen erfolgte weit rascher in solcher Erde. Noch mehr! Die Menge von Phosphorsäure erwies sich in den Ausscheidungen als bedeutend, was auch von den Kali- und den Kalksalzen gilt. … Man sieht somit, dass der Regenwurm den Boden nicht bloss ackert und eggt, sondern auch düngt; dass er nicht blos mechanisch, sondern auch chemisch arbeitet und auf diese Weise das Erdreich, auf welchem die Pflanzen gedeihen sollen, für diese trefflich zubereitet. *(Die Umschau, VI. Jg., No. 32, S. 636, 1902)*

Das Festnetz der Bienen

Den Großteil ihres Lebens verbringen Honigbienen nicht im Freien mit Sammeln, sondern auf ihren Waben. In ihnen speichern sie ihre Nahrung und ziehen ihre Brut auf. Den wächsernen Strukturen kommt aber noch eine andere wichtige Funktion zu: als Medium für Kommunikationssignale.

Von Jürgen Tautz

Mit ihrem eindrucksvoll regelmäßigen Erscheinungsbild, das eher an Kristalle als an tierische Bauwerke erinnert, faszinieren die Waben der Honigbienen seit jeher den Menschen. Künstlern dienen sie als Vorbild für geometrische Ornamente, Ingenieuren als Modell für stabile Leichtbauweisen, Mathematikern sind sie eine Herausforderung für Optimierungsberechnungen. Es gab Zeiten, da wurde den Tieren sogar eine gewisse mathematische Begabung zugeschrieben – dürfen doch die Winkel zwischen den planen Seitenwänden der Wabenzellen höchstens um Bogenminuten voneinander abweichen.

Imkern sind die Waben als Speicherraum für Nektar und Pollen vertraut, ebenso als Kinderstube für die Larven und Puppen des Bienenstaats. Biologen aber bietet sich die einmalige Gelegenheit, diese Bauwerke als Stein gewordenes Verhalten zu analysieren. Das fängt beim Baustoff Wachs an und geht bis zu Fragen nach der Wechselwirkung zwischen versteinertem und natürlichem Verhalten – vor allem im Zusammenhang mit der Tanzsprache dieser Insekten. Erste verblüffende Einsichten konnten wir bereits gewinnen. Manche korrigieren oder widerlegen ältere Vorstellungen, nicht zuletzt auch dank ausgefeilter technischer Möglichkeiten.

Weltweit existieren schätzungsweise 20 000 bis 40 000 Bienenarten. „Unsere Biene schlechthin“ gehört zum kleinen illustren Kreis der Honigbienen, zur Gattung *Apis*. Systematiker unterschieden derzeit neun getrennte Arten, von denen die meisten in den asiatischen Tropen und Subtropen beheimatet sind. Beim Wabenbau gibt es in diesem Kreis aber nur schlicht zwei Kategorien: Entweder hängen die Tiere nur eine einzige Wabe aus den typischen sechseckigen Zellen unter freiem Himmel auf, wie die südostasiatische Zwerghonigbiene, oder sie bringen mehrere Waben in einen geschützten Hohlraum unter.

Ihren Hauptbaustoff, das Wachs, stellen die Bienen selbst her: Fast sieht es so aus, als würden sie ihn aus den „Rippen schwitzen“ (siehe Foto Seite 62). Dazu kommen gesammelte Pflanzenharze. Die Höhlennister unter den Bienen verwenden dieses Material zusammen mit eigenen Sekreten als so genanntes Kittharz zum Abdichten ihrer Behausung. Afrikanische Honigbienen bauen damit sogar so etwas wie Gefängniszellen für eingedrungene räuberische Käfer, wie vor kurzem Peter Neumann von der Universität Halle gemeinsam mit Christian Pirk und Randall Hepburn von der Rhodes University in Grahamstown, Südafrika, beobachtete. Frei nistende Arten hingegen, die nur in warmen Klimazonen vorkommen, mischen das Kittharz ihrem Wachs bei, vermutlich als Schmelzschutz.

Bereits auf einer einzigen Wabe leben viele tausend Individuen zusammen. Angesichts der hoch entwickelten Kommunikation im Bienenvolk – man denke nur an die berühmte Tanzsprache – lag die Vermutung nahe, dass der gemeinsame Boden unter den Füßen mehr ist als nur ein genial konstruiertes Raster von Behältern. Könnte er auch für Kommunikationssignale optimiert sein?

Honigbienen sind immerhin in der glücklichen Lage, volle Kontrolle über ▶

H. HEILMANN



S. FUCHS, H. HEILMANN

Die einheimische Honigbiene baut mehrere Waben gut geschützt in hohlen Bäumen oder an ähnlichen Plätzen (rechts). Die wächserne Konstruktion leitet Vibrationen weiter, die der Kommunikation dienen.



IN KÜRZE

➤ Der Schwänzeltanz der Bienen ist das höchstentwickelte Kommunikationsmittel unter Insekten. Welche verblüffenden Verständigungsmöglichkeiten dabei die mitschwingende wächserne Wabe bietet, ermitteln Forscher erst jetzt mit ausgefeilten Techniken.

➤ Der Tanzboden entpuppt sich als eine Art telefonisches Festnetz für Mitteilungen geschäftlicher Art bis hin zum Gefahrenalarm.

die Eigenschaften ihres Heims auszuüben: Sie bestimmen sowohl dessen Baustoff Wachs als auch dessen Architektur. Im Zuge natürlicher Auslese könnten somit die hergestellten Waben besondere Merkmale erhalten haben, die im Dienste der Kommunikation stehen. Dann müsste es zum einen Bienensignale geben, die zu den Weiterleitungseigenschaften der Wabe passen und umgekehrt. Zum anderen müssten je nach Art der Kommunikation spezielle Verhaltensweisen der Bienen zu beobachten sein. Schließlich macht es einen Unterschied, ob jemand bloß die Gesprächspartner einer kleinen Tischrunde auf sich aufmerksam machen möchte oder gleich einen ganzen Saal voller Menschen. Und eine rein geschäftliche Mitteilung wird man anders übermitteln als etwa den Alarmruf „es brennt“.

Relativ leise und intim sollte es in dem Winkel des dunklen Stocks unserer Honigbiene zugehen, wo sich der Tanzboden befindet. Erfolgreiche Sammlerinnen teilen dort ihren umstehenden Nestgenossinnen tanzend die Lage der entdeckten Futterquelle mit. Der österreichische Zoologe Karl von Frisch (1886–1982) hatte in den 1940er Jahren erkannt, dass die Information über die Lage sich im zeitlich-räumlichen Aufbau der Tanzfiguren versteckt. Ganz besonders gilt das für den so genannten Schwänzeltanz: eine Figur in Form einer Acht, bei der die Biene das Mittelstück durch ein auffälliges rasantes Schwänzeln hervorhebt. Die Zeitspanne für diese Schwänzelstrecke korreliert mit der Entfernung der Futterquelle – und die Körperrichtung beim Schwänzeln zeigt indirekt die einzuschlagende Flugrichtung gegenüber der Sonne an. Um diese Informationen aufnehmen zu können, drehen sich die anzuwerbenden neuen Sammlerinnen im Stock als Nachtänzerinnen beim Ballett der Bienen mit.

Wie aber können Interessentinnen überhaupt auf eine Tänzerin aufmerksam werden und sie aufsuchen, wenn es im Stock buchstäblich stockdunkel ist. Eine pantomimische Aufforderung zum Tanz macht bei Stromausfall wenig Sinn – eine rhythmisch „stampfende“ schon eher.



CHR. RAU, R. SANDEMAN

Für den Wabenbau produziert eine Gruppe von Bienen im Volk Wachsschuppen. Das Material tritt auf sechs Drüsenfeldern auf der Bauchseite aus. Die fertigen Schuppen fallen ab und werden von einer anderen Gruppe aufgesammelt und verbaut. Die oberen Ränder der Wabenzellen werden durch Wachswülste verstärkt, die Vibrationen weiterleiten können.

Auf einem Tanzboden im Stock bewegen sich allerdings oft viele Tänzerinnen in Abständen von wenigen Bienenlängen voneinander. Um gegenseitige Störungen zu minimieren und um nicht zu viele Interessentinnen anzulocken – höchstens ein Dutzend finden um eine Tänzerin Platz –, dürfen es keine weit tragenden Signale sein. In der Dunkelheit des Bienenstockes kommen dafür vor allem mechanische Signale in Betracht.

In diese Richtung spekulierte bereits von Frisch, allerdings im Zusammenhang mit der Lageübermittlung. Der spätere Nobelpreisträger nahm an, dass eine Nachtänzerin die vorgetanzte Information regelrecht abgreift, indem sie mit ihren Antennen auf Tuchfühlung zur Vortänzerin geht. Es könne aber auch sein, schrieb er 1965, dass die Vibrationen des „Schwänzeltones“ auf die Wabe übertragen und von den Nachläuferinnen durch sehr empfindliche Sinnesorgane in den Beinen wahrgenommen werde.

Lockender Tanz auf löchrigem Parkett

Kurz zuvor hatten unabhängig voneinander Harald Esch an der Universität München und Adrian Wenner an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara entdeckt, dass Bienentänzerinnen während der Schwänzelphase mit ihrer Flugmuskulatur ein leises Schnarren erzeugen. Dieser Schwänzelton ist allerdings nur mit technischen Hilfsmitteln für uns zu hören. Da Bienen – anders als Menschen – auf Luftschall nicht ansprachen, vermutete von Frisch, dass feinste Bodenvibrationen eine Rolle spielen könnten.

Die scheinbar simple Frage zu entscheiden, ob die Nachtänzerinnen mit den Antennen tasten, mit den Beinen fühlen oder sich doch über andere Kanäle informieren, erwies sich als harte Nuss. Dem wissbegierigen Forscher bleibt nur: potenzielle Signale zu messen und die Bienen zu befragen. Das setzt natürlich entsprechende technische Möglichkeiten voraus – und einen scharfen Blick für das, was die Tiere wann tun.

So stellte sich Ende der 1990er Jahre heraus, dass die Antennenkontakte intensiver und damit für den Informationstransfer wohl doch bedeutungsvoller sind als zwischenzeitlich gedacht. Zu dieser Erkenntnis verhalfen uns Videoaufzeichnungen in extremer Zeitlupe. Daraus ermittelte Kristin Rohrseitz in meinem Labor an der Universität Würzburg, dass Nachtänzerinnen immerhin für nahezu achtzig Prozent der Schwänzelphase mit den Antennen ihre Ballettmeisterin berühren. Auf solchen Aufnahmen ist auch

zu sehen, dass echte Nachläuferinnen ihre Beine in ganz exakter Weise setzen – anders als zufällig kurz folgende Genossinnen, die kaum Tuchfühlung halten.

In allerjüngster Zeit berichtete der dänische Biologe Axel Michelsen an der Universität Odense über eine weitere mechanische Signalkomponente: Die beim Bienentanz vibrierenden Flügel erzeugen Luftströmungen, die für kommunikative Zwecke gerichtet eingesetzt werden könnten.

Kommen den einzelnen Signalformen unterschiedliche Aufgaben zu? Oder sind sie einfach nur redundant – nach dem Motto: Doppelt genäht hält besser? Welche Rolle spielt das Schnarren bei der Kommunikation? Dass es eine Bedeutung haben muss, sogar eine erhebliche, konnte schon Esch belegen: Verlief ein Tanz „stumm“, was sehr selten geschieht, blieb die Wirkung aus. Aber erzeugt eine schnarrende Tänzerin überhaupt Bodenvibrationen? Michelsen hatte Ende der 1980er Jahre noch keine feststellen können, als er mit Wolfgang Kirchner, heute Universität Bonn, dieser Frage nachging.

Der technische Fortschritt erlaubte uns mittlerweile einen High-Tech-Angriff auf das vermutete Telefonnetz der Bienen. Zuvor aber befragten wir – ganz in der Tradition des Nobelpreisträgers – schlicht und einfach die Honigbienen direkt, ob Wabenvibrationen für sie bei der Tanzkommunikation überhaupt eine Rolle spielen. Wir heißt: nebst Mitgliedern unserer Würzburger Arbeitsgruppe auch Martin Lindauer, ein Schüler Karl von Frischs, der mich von den Krebsen zu den Bienen bekehrte, sowie David Sandeman, ein Gastprofessor aus Sydney, den wir „Bienen-infizieren“ konnten.

Ihren Tanzplatz richten Bienen in der Nähe des Flugloches auf möglichst leeren Waben ein. Aus menschlicher Sicht ein ziemlich löchriges Parkett: Die rund anderthalb Zentimeter hohen Wände einer sechseckigen Wabenzelle sind nur eine Drittel so dick wie ein durchschnittliches Menschenhaar. Ihre oberen Ränder tragen jedoch relativ kräftige Wulste, immerhin doppelt so dick wie ein Haar. Auf eben diesem Sechseckgitter spazieren und tanzen die Tiere.

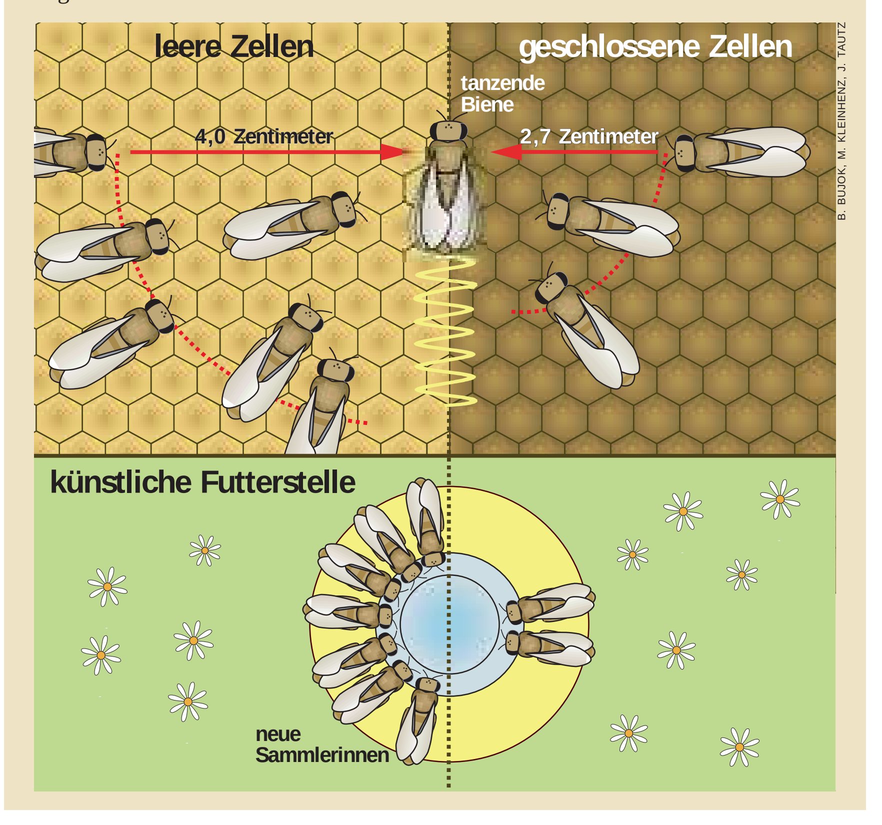
Wir sorgten nun dafür, dass ihr Tanzplatz auf bereits versiegelten Brutzellen lag. Gefüllt mit je einer großen Larve, zudem mit einem Wachsdeckel verschlossen, kann ein solcher Untergrund feine Vibrationen zwangsläufig nur schlecht weiterleiten. Tatsächlich hatten Tänze auf glattem Parkett keinen sonderlichen Erfolg. Nur wenige rekrutierte Neulinge fanden sich an der künstli- ▶

Der Tanzboden macht die Musik



Eine erfolgreiche Sammlerin versucht durch den berühmten Schwänzeltanz, bei dem sie eine Acht beschreibt, ihren Stockgenossinnen die Lage einer fernen Futterquelle mitzuteilen (oben). Im Takt des Schwänzelns lässt sie den Flugmotor in ihrer Brust im Leerlauf aufheulen. Dessen Vibrationen übertragen sich auf die Wabe und haben, wie der unten beschriebene Versuch zeigt, Signalwirkung für die anzuwerbenden Hilfskräfte. Interessentinnen nähern sich der Tänzerin und klinken sich in das Ballett ein.

Lassen wir die Werberin auf fragilen leeren Zellen tanzen (unten links), lockt sie Nachtänzerinnen aus einer Entfernung an, die bis zu einer Bienenlänge größer ist als auf Brutzellen, die mit einem dicken Wachsdeckel verschlossen sind und daher Vibrationen schlechter leiten (rechts). So gering dieser Effekt zunächst auch erscheinen mag: Die Erfolgsbilanz am Futterplatz ist viel höher, denn dort treffen drei- bis viermal so viele Neulinge ein. Tatsächlich bevorzugen Bienen leere Waben als Tanzboden.



chen Futterstelle im Feld ein. Tanzten die werbenden Sammlerinnen dagegen auf den fragilen leeren Zellen, kamen bis zu viermal mehr neue Helfer an (siehe Kasten Seite 63).

Dieses Ergebnis konnte theoretisch zweierlei bedeuten: Ohne „good vibrations“ war entweder die Lageinformation, die im Tanz steckt, nicht gut genug zu ermitteln, oder die potenziellen Rekruten wurden schlechter auf die Tänzerin aufmerksam. Wir vermuteten eher Letzteres. Eine Tänzerin muss umstehende Bienen im dunklen Stock ja erst einmal irgendwie anlocken und zum Mittanzen auffordern. Dieser Aspekt wurde in früheren Untersuchungen vernachlässigt. Ein Blick in den Stock erhärtete unseren Verdacht. Die Distanz, aus der sich echte Interessentinnen der werbenden Biene näherten, war auf leeren Zellen etwa um eine Bienenlänge größer als auf gedeckelten Brutzellen.

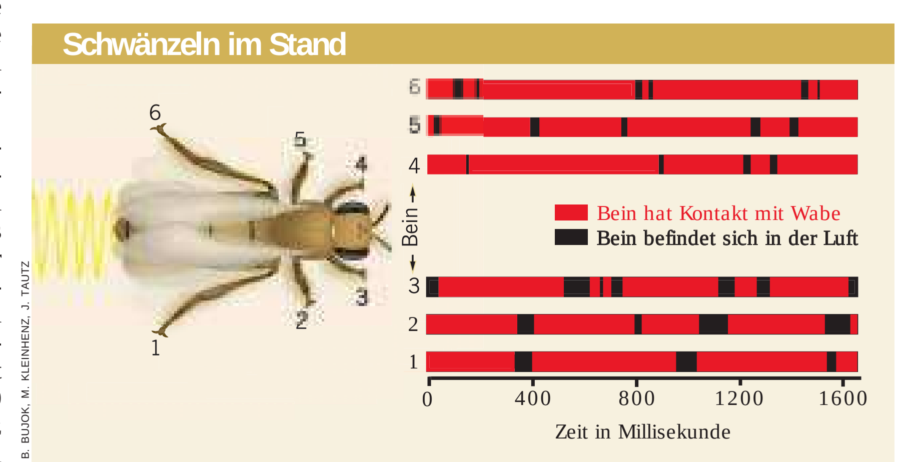
Es lohnte also, den Bodenvibrationen intensiver nachzugehen. Nach welchen Frequenzen wir Ausschau zu halten hatten, war klar. Im Brustabschnitt des Bienenkörpers brummt ein Flugmotor mit Muskelkraft. Während der Schwänzelphase des Tanzes kontrahieren sich diese Muskelpakete mit derselben Frequenz wie beim Schlagen der Flügel: mit 200 bis 300 Hertz, also 200 bis 300 Schwingungen pro Sekunde. Im Tanz allerdings sind die Flügel weitgehend ausgekoppelt – als würde ein Autofahrer gleichzeitig auskuppeln und Vollgas geben. Sie zittern nur noch leicht mit. Der Motor, der letztlich den Schnarrlaut erzeugt, lässt die ganze Brust vibrieren, erzeugt aber nicht das Schwänzeln selbst.

Der Flugmotor läuft jedoch, was schon länger bekannt ist, nicht kontinuierlich während des ganzen Schwänzelns mit. Vielmehr treten Pulse von etwa 30 bis 50 Millisekunden Länge auf. Dank unserer modernen Möglichkeiten konnten wir ihr Timing beim Tanz bestimmen: Sie erscheinen in der Regel nur kurz vor jedem Umkehrpunkt eines vollen Schwänzelausschlags – als Tusch vorweg sozusagen.

Dieser Effekt half uns, die entsprechenden Wabenschwingungen aufzuspüren. Sie nämlich direkt um eine Tänzerin zu messen, erwies sich als extrem schwierig, weil die quirligen Aktivitäten des übrigen Volkes für einen enormen Rauschpegel sorgen. Parallel zur Vibrationsmessung mit berührungsloser Laser-Doppler-Vibrometrie machten wir deshalb Videoaufnahmen in extremer Zeitlupe. Dadurch konnten wir das Zeitfenster der Schwingungsanalyse sehr exakt mit den Bewegungsphasen der Tänzerin abstimmen. Ergebnis: Die Vibrationen, die sie kurz vorm Umkehrpunkt generiert, äußern sich prägnant in seitlichen Auslenkungen des Netzes, das von den Randwülsten aller Wabenzellen im Umkreis gebildet wird. Hätten wir uns nur auf Vertikalschwingungen konzentriert und zudem über die gesamte Spanne des Schwänzelns gemittelt – wie andere Forscher es taten –, dann wären auch wir zu dem falschen Schluss gelangt, eine Tänzerin erzeuge keine Bodenvibration.

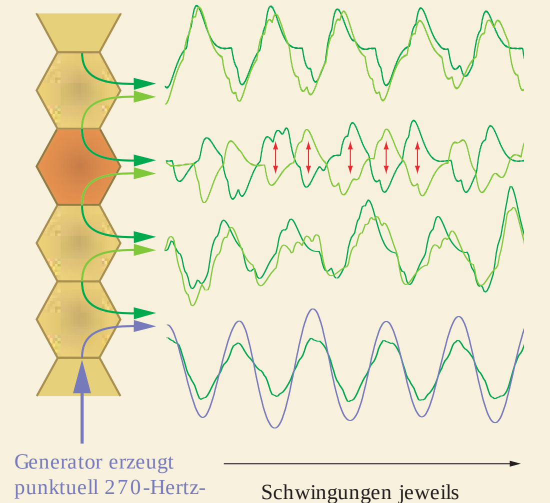
Beim Auswerten unserer Zeitlupenaufnahmen stießen wir auf eine weitere Überraschung. Von Frisch hatte das Tanzelement, bei dem die Biene schwänzelte, als Schwänzellauf bezeichnet. Seine Schemazeichnungen hierzu suggerierten eine relativ lange Laufstrecke – und so findet es sich auch in jedem Lehrbuch und Nachschlagewerk. Man kann daher vielleicht unsere Verblüffung nachfühlen, als wir feststellten, dass die Tänzerin in Wirklichkeit die meiste Zeit stand, irgendeinen Fuß zwar immer mal anhob, aber sogleich wieder aufsetzte (obere Grafik). Ihr Körper schob sich dabei in der Luft kontinuierlich vorwärts, während er von vorn betrachtet gleichzeitig rasch hin und her schaukelte – ungefähr so, als würde man im Krätschstand den Rumpf abwechselnd nach rechts und links kippen und gleichzeitig vorbeugen. Eine Biene schwänzelt – oder besser: schaukelt – allerdings mit einer Frequenz von 15 Hertz und schnarrt dabei prak-

Schwänzeln im Stand



Jahrzehntealter Irrtum: Nach neuen Analysen läuft die Tänzerin während des Schwänzelns nicht, sondern steht die meiste Zeit. Einzelne Füße werden vollkommen unkoordiniert gehoben und auf der Suche nach einem neuen festen Stand wieder aufgesetzt. Der Körper der Tänzerin schiebt sich dabei kontinuierlich über den stehenden Füßen schaukelnd vorwärts. Nur kurz vor jedem Maximalausschlag des Körpers heult der Flugmotor im Leerlauf auf und erzeugt Vibrationen einer Frequenz zwischen 200 und 300 Hertz.

Künstliches Wabenbeben



Das Netzwerk sechseckiger Wachswülste oben auf den hauchdünnen Zellenwänden überträgt künstliche Schwingungen (blau) am besten, wenn sie im Frequenzbereich der Vibrationspulse liegen, die eine Tänzerin produziert. Die Zellenränder werden dabei seitlich ausgelenkt. Die Horizontalschwingungen (grün) erzeugen im Netz ein Muster, bei dem einzelne Zellen in der Nähe der Tänzerin sich abheben, weil ihre Wülste in Gegenphase schwingen (rot). Sie könnten Interessentinnen im dunklen Stock den Weg zur Tänzerin weisen.

tisch vor jedem Maximalausschlag mit 200 bis 300 Hertz. Versuchen Sie erst gar nicht, es nachzumachen. Kurzum: All dies weckt den Verdacht, dass die uns auffallende Schwänzelbewegung auch die wichtige Aufgabe hat, die Vibrationspulse der Flugmuskulatur effektiv an die Wabe anzukoppeln.

Heiße Rhythmen – heiße Bienen

Wir fragten uns natürlich sofort, wie gut die Wabe den Anforderungen als Kommunikationsnetz gerecht wird. Unter einigen vereinfachenden Annahmen hatte der dänische Biologe Jesper Storm im Labor von Michelsen berechnet, dass eine Tänzerin während des Schwänzelns nur eine Kraft von maximal einem tausendstel Newton auf die Ränder der Zellen ausübt. Mit dieser Kraft und dem von uns bei Bienen gemessenen Frequenz- und Zeitmuster haben wir dann künstlich die Zellenränder einer leeren Wabe angeregt. Technisch lässt sich das heute recht einfach mit Hilfe von Piezo-Kristallen bewerkstelligen. Tatsächlich leiten die Waben solche Signale am besten als horizontale Schwingungen des „Festnetzes“ weiter (untere Grafik auf Seite 64). Es entstehen zwar noch andere Wellentypen, wie man sie auch von Erdbeben kennt. Doch keiner ist in dem kritischen Frequenzfenster so wirkungsvoll.

In der natürlichen Situation kann das Signal freilich im Untergrundrauschen versteckt sein. Schließlich gehen auf einer Wabe zahlreiche Artgenossinnen einer Beschäftigung nach. Doch schon am bloßen Verhalten der gefilmten Bienen, die in der Nähe einer Tänzerin stehen oder gehen, sieht man, dass sie diese sehr zuverlässig im Dunkeln erkennen. (Beim Filmen verwenden wir infrarotes Licht, für das Bienen blind sind.)

Wie lösen die Tiere dieses Signal-Rausch-Problem? Mit ihren sechs Beinen verfügen sie im Stand über sechs simultan arbeitende Sensoren, deren Input verrechnet werden kann. Für uns ergab sich das Problem, dass wir keinen Forscherkollegen kennen, der über sechs vollkommen identische Laser-Doppler-Vibrometer für eine Simultanmessung verfügt. Jerome Casas, ein französischer Kollege an der Universität Tours, konnte jedoch mit zweien aufwarten. An einer leeren, künstlich angeregten Wabe ließ sich so messtechnisch nachvollziehen, was zumindest zwei der sechs Bienenbeine gleichzeitig wahrnehmen können.

Die Spurweite des Insekts entspricht in etwa der Breite einer Zelle. Wir maßen deshalb an den beiden gegenüberliegenden Wänden jeder Zelle einer Reihe. Bei der bestübertragenen Frequenz schwangen sie in die gleiche Richtung – mit einer Ausnahme: In jeder Reihe fand sich eine einzige Zelle, deren Wände in exakter Gegenphase schwingen, also einen Schwingungsknoten einschließen. Je nach Position des Anregungspunktes, ob eher am Rand oder zur Wabenmitte hin, lag der Knoten bis zu sieben Zellen entfernt. Die auf dem Gitterwerk stehenden oder gehenden Bienen könnten diese besondere Zelle erkennen und als Nähe zu einer Tänzerin deuten. Den maximalen Abstand, aus dem Interessentinnen noch von einer Tänzerin angelockt werden, kennen wir von unseren Verhaltensexperimenten. Er beträgt 35 Millimeter, was wieder genau sieben Zellen entspricht.



S. FUCHS, H. HEILMANN

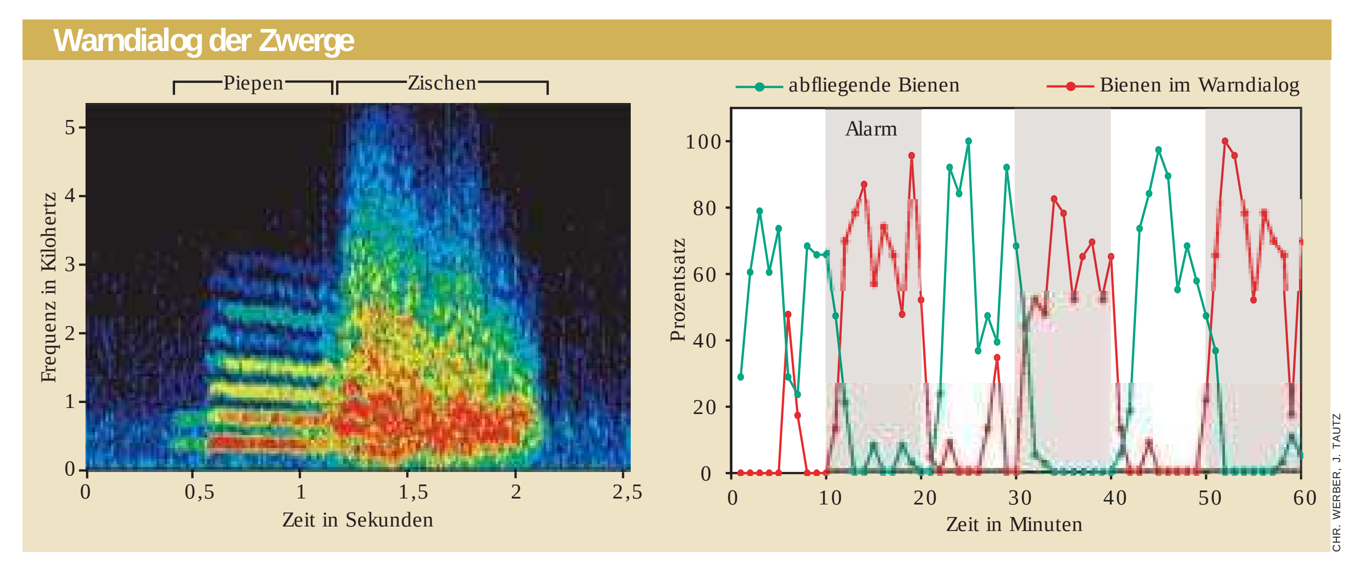
Die asiatische Zwerghonigbiene hat nur eine Wabe, und diese hängt im Freien. Die obere „Glatze“ der Wabe dient als Tanzboden und Alarmleitung (rechts in der Mitte eine Tänzerin, umringt von Interessentinnen).

Sehr wahrscheinlich nutzen Interessentinnen noch andere Hinweise, um die Tänzerin im Dunkeln zu lokalisieren. In Frage kommen gerichtete Luftbewegungen durch die Flügelvibrationen sowie die höhere Temperatur der Tänzerin, vielleicht auch Geruchsstoffe. Auf einem Tanzboden geht es nämlich heiß her: Mit Wärmekameras konnten wir sehen, dass eine tanzende Biene immer wieder regelrecht aufglüht.

Was die Wabenvibrationen anbelangt, so vermuten wir inzwischen, dass sie selbst nur begrenzt oder gar keine Detailinformationen über die Lage einer Futterstelle vermitteln. Für eine zuverlässige genaue Übermittlung erscheinen uns die Schwingungsmuster als zu wenig differenziert, im Zeitverlauf ebenso wie in ihrer räumlichen Ausdehnung. Dafür kommt ihnen aber wohl die sehr wichtige Aufgabe zu, den anderen Bienen auf dem schummrigen Tanzboden zu signalisieren, wo eine Mitbewohnerin gerade gute Kunde überbringt. Haben die angesprochenen Bienen die Tänzerin erreicht und mit ihr Kontakt aufgenommen, könnten dann die anderen Signalformen intime Einzelheiten der Tanzbotschaft vermitteln. Dabei wird offensichtlich der direkte Draht bevorzugt: die Antennen.

Ganz gleich, wie heftig eine Biene auch schwänzeln mag, sie bringt natürlich nicht gleich die ganze Wabe zum Be- ▶

Warndialog der Zwerge



Heimkehrende Zwerghonigbienen alarmieren ihr Volk, wenn sie in Nestnähe eine Gefahr bemerken. Das beunruhigte Tier veranlasst dabei mit einem zarten „Piepen“ binnen kurzem das ganze Volk zu einem hörbaren Zischen. Das relevante Signal sind die dabei erzeugten Bodenvibrationen (linkes Diagramm). Sie pflanzen sich bis ans Ende der Wabe fort, weil die Zischantwort nach den Schneeballprinzip weitergegeben wird. Solange der Alarm anhält, verlässt keine Biene mehr das Nest (grüne Kurve).

ben. Das soll sie ja auch gerade nicht. Ein Typ von Nachricht, der dagegen sehr rasch möglichst viele Mitglieder einer Bienenkolonie erreichen sollte, betrifft die Warnung vor einer Bedrohung des Volkes. Bei der asiatischen Zwerghonigbiene lebt das ganze Volk auf einer einzigen Wabe im Freien (Fotos Seite 65). Das Bauwerk hängt an einem Ast herab und umschließt ihn oben mit einer kleinen Plattform. Regelrechte Leimringe halten Ameisen ab, die sich gerne an Süßem vergreifen. Vor größeren Räubern schützt diese Maßnahme allerdings nicht. Dass in solchen Fällen die Zwergbienen ihre Wabe als Übertragungsstrecke für Alarmsignale verwenden, entdeckten mein Kollege Stefan Fuchs und ich bei einem Studienaufenthalt als Gäste von Raghavandra Gadagkar im indischen Bangalore.

Beim Beobachten der Tiere und ihrer Kommunikation war uns ein zartes, nur hin und wieder ertönendes Piepen aufgefallen. Auf der Tonspur von Videoaufzeichnungen, die automatisch ohne unsere Anwesenheit am Nest gemacht wurden, war nichts dergleichen zu hören. Also hatten wohl wir Beobachter dieses Verhalten ausgelöst. Daraufhin installierten wir in der Wabe Beschleunigungsmesser, die noch feinste Schwingungen registrieren können, und hatten am Ende folgende Geschichte beisammen:

Wenn Sammelbienen beim Rückflug nahe am Nest eine potenzielle Gefahr, etwa einen Menschen oder einen großen Vogel, bemerken, landen sie auf der oberen Plattform der Wabe und pressen ihre Brust auf geeignete Abschnitte. Kurz danach ist über die Luft ein schwaches Piepen zu hören. Diese Bienen suchen danach sofort eine neue Stelle auf, piepen wieder und so fort. Dieses kaum hörbare Piepen ist aber nur ein Teil eines einmaligen Dialogs, der sich zwischen der Alarm schlagenden Sammlerin und dem gesamten übrigen Volk entspannt. Die einzelnen Piep-Laute werden bereits nach wenigen Malen von der gesamten Kolonie mit einem zischenden Rauschen beantwortet, das als Luftschall ebenfalls nur schwach hörbar ist, aber wie das Piepen sehr gut als Wabenschwingung erfasst werden kann (linkes Diagramm).

Was die informierten Bienen tun, hat mein Mitarbeiter Christian Werber durch gründliche Analyse unserer mitgebrachten Videobänder ermittelt. Postiert sich ein Mensch in der Nähe eines Nestes, wird er offenbar als Störung gewertet, da dies den Warndialog auslöst. Sofort wird der Tanzbetrieb komplett eingestellt, und solange der Dialog anhält, verlassen auch keine Bienen mehr die Kolonie. Das Volk steht quasi Gewehr bei Fuß (rechtes Diagramm). Das Startverbot für Einzelflieger macht aber noch in anderer Hinsicht Sinn. Sie wären leichte Beute für Vögel, die das Nest als ergiebige Quelle rasch entdecken, aber nicht direkt angreifen, sondern, wie wiederholt von uns beobachtet, sich in dessen Nähe auf einen Ast platzieren, um heimkehrende Sammlerinnen mit ihrer Fracht abzufangen.

Aus all diesen neueren Erkenntnissen wird klar, dass die Erforschung der Biokommunikation einen methodisch extrem breiten Ansatz erfordert. Insbesondere die quantitative Erfassung der Signale und ihrer Ausbreitung steht und fällt mit dem technischen Stand. Der Einsatz zeitgemäßer Methoden hat gezeigt, wie hervorragend Honigbienen im Laufe ihrer Evolution die einzelnen kommunikativen Faktoren aufeinander abgestimmt haben: die produzierten Vibrationssignale, deren Weiterleitung über die Waben und die jeweils gewünschte Publikumsgröße. ■



Jürgen Tautz *ist Professor für Verhaltensphysiologie und Soziobiologie am Biozentrum der Universität Würzburg. Promoviert hat er 1977 an der Universität Konstanz in Zoologie. Sein Forschungsschwerpunkt lag zunächst auf der Neurobiologie der Krebse. Zur Bienenforschung wechselte er dann vor sieben Jahren.*

Literaturhinweise

Telefonnetz und chemisches Gedächtnis: Wachs als vielseitiges Kommunikationsmedium der Honigbiene. Von J. Tautz und M. Lindauer in: Akademie-Journal, Heft 1, S. 15, 1999.

How do dancing honeybees attract the attention of their audience? Von J. Tautz et al. in: Journal of Experimental Biology, Bd. 204, S. 3737, 2001.

Transmission of vibration across honeycombs and its detection by bee leg receptors. Von D.C. Sandeman, J. Tautz und M. Lindauer in: Journal of Experimental Biology, Nr. 199, S. 2585, 1996.

Weblinks finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*

ESSAY

Die Mär vom Jungbrunnen

Namhafte amerikanische Wissenschaftler warnen vor den Angeboten der boomenden Anti-Aging-Industrie.

In einem öffentlichen Appell verweisen amerikanische Alternsforscher auf die Nutzlosigkeit und sogar Gefahren von Mitteln und Kuren gegen das Altern. Nach wissenschaftlichen Erkenntnissen lässt sich die natürliche Alterung durch kein derzeit angepriesenes Mittel aufhalten. Drei der 51 Unterzeichner begründen hier ihre Ansicht. Die vollständigen (englischen) Texte aller Beteiligten mit Literaturverweisen finden Sie bei „Scientific American" unter der Internet-Adresse **www.sciam.com/explorations/2002/051302aging/**.

Von S. Jay Olshansky, Leonard Hayflick und Bruce A. Carnes

Menschen sehnen sich nach ewiger Jugend – so weit wir zurückblicken können – und schon immer fielen sie auf Scharlatane und Quacksalber herein, die Pillen und Säfte gegen das Alter feilboten. Schon immer gab es aber auch die ernstliche Suche nach Verjüngungsmitteln. Besonders Gold galt im Mittelalter als Elixier für ein langes Leben.

In letzter Zeit jedoch ufern die Angebote der so genannten Anti-Aging-Medizin bedenklich aus, und Jung und Alt greift massenhaft auf die höchst verlockenden Fitnessversprechungen zu. Eine inzwischen fast unübersehbare Palette angeblich wissenschaftlich gestützter Kuren und Mittel aller Art drängt auf den Markt, wobei das Internet gewinnstrebenden Anbietern den Kundenkontakt noch leichter macht.

Diese Entwicklung beobachten wir mit Sorge. Darum haben wir uns gemeinsam mit einer größeren Anzahl unserer Kollegen aus der Alternsforschung entschlossen, eine warnende Stellungnahme zu veröffentlichen. Die Menschen sollen wissen, dass sich bisher nach allen wissenschaftlichen Erkenntnissen keine einzige der heute vermarkteten Maßnahmen dafür eignet, das natürliche Altern zu verlangsamen, aufzuhalten oder gar rückgängig zu machen. Manche der angepriesenen Methoden können sogar gefährlich werden. Viele Biologen, die intentiv über die Ursachen des Alterns forschen, hoffen zwar, tatsächlich einmal auf Mittel und Wege zu stoßen, die den Alterungsprozess hinauszögern. Dadurch würde die Gebrechlichkeit im Alter später einsetzen und eine gute Lebensqualität bliebe länger erhalten. Wer allerdings heute schon behauptet, er hätte dergleichen Produkte parat, der irrt entweder oder er lügt bewusst. In dem hier abgedruckten Essay stellen wir drei Autoren unsere eigene Sicht dar.

Der Begriff „Altern" wird nicht einheitlich gebraucht. Wir verstehen darunter, dass sich im Laufe der Jahre in den Bausteinen des Lebens zufällige Schäden anhäufen, insbesondere in der Erbsubstanz, den Proteinen, Kohlenhydraten und Lipiden. Das geschieht von Jugend an, doch irgendwann werden die Selbstreparaturmechanismen des Organismus mit den Defekten nicht mehr fertig. Nach und nach beeinträchtigt dies Funktionen von Zellen, Geweben, Organen und Organsystemen, was den Organismus einerseits krankheitsanfälliger macht, zum anderen die typischen Altersabbau-Erscheinungen und Leistungseinbußen hervorruft. Diese manifestieren sich unter anderem im Verlust von Muskel- und



Knochenmasse, im Rückgang der Reaktionsschnelligkeit sowie des Seh- und Hörvermögens und in verminderter Hautelastizität.

Die Ursachen für die Defekte an den biologischen Molekülen sind vielfältig. Vertrackterweise haben offenbar auch die lebenserhaltenden Prozesse der Energiegewinnung daran Anteil. Bei der regulären Zellatmung entstehen in den Kraftwerken der Zellen, den Mitochondrien, höchst aggressive Sauerstoffradikale. Größtenteils reparieren die Zellen die von diesen so genannten freien Radikalen angerichteten Schäden – nur eben nicht immer. Biologen vermuten, dass die Sauerstoffradikale das Erbgut der Mitochondrien und damit die Zellatmung allmählich irreparabel beeinträchtigen. Schließlich können die Zellen das reguläre Zusammenspiel von unzähligen Molekülen für wichtige Körperfunktionen nicht mehr aufrechterhalten. Die freien Radikale dürften außer den Mitochondrien auch andere Orte in den Zellen angreifen.

Altern und Alterskrankheiten sind zweierlei

Zwar bewirkt Altern, in diesem Sinne verstanden, dass der Mensch für manche Krankheiten anfälliger wird, etwa für bestimmte Herzleiden, Alzheimer, Schlaganfall oder Krebs. Diese Erkrankungen sind allerdings nur Begleiterscheinungen, die nicht mit dem Alternsprozess selbst gleichgesetzt werden dürfen. Denn sogar wenn man die typischen Alterskrankheiten – die heute in Industrienationen die führenden Todesursachen darstellen – eines Tages sollte unterbinden können, wäre damit der Vorgang des Alterns nicht verschwunden. An die Stelle der jetzigen Krankheiten betagter Menschen würden andere treten. Und mit Sicherheit würden, bedingt durch die Alterung, schließlich physiologische Funktionen, etwa der Kreislauf, zusammenbrechen. Die biologische Wahrheit ist, dass die Lebensmaschinerie, einmal angeworfen, unausweichlich selbst die Keime zu ihrer Vernichtung legt.

Daran ändert auch nichts, dass wir in den Industrieländern heute viel länger leben als jemals in der Menschheitsgeschichte. In früheren Jahrhunderten wurden die Menschen durchschnittlich nur etwa 25 Jahre alt. Heute dagegen beträgt die Lebenserwartung für Männer in den Industrienationen ungefähr 75, für Frauen 80 Jahre, und sie dürfte in Zukunft weiter steigen. Einen Großteil dessen verdanken wir der Eindämmung und Bekämpfung von Infektionskrankheiten mit Impfungen, besserer Hygiene und Antibiotika.



ZEFA

Kein erhältliches Produkt macht wieder jung. Alterung ist ein unausweichlicher biologischer Prozess, den bisher nichts aufhalten oder gar umkehren kann.

Wir leben heute nicht etwa deswegen länger, weil wir anders altern, sondern weil wir anders leben. Obwohl der Vorgang unausweichlich geschieht, existiert für das Altern nicht etwa ein genetisches Programm. Die Mechanismen der Evolution würden eine Auslese spezieller Gene für einen physiologischen Abbau nach einem genauen zeitlichen Plan gar nicht zulassen. Es gibt auch keine Gene, welche die Lebensdauer bestimmen.

Denn Gene schaffen die Voraussetzungen für ihre Weitergabe an die nächste Generation, indem sie dafür sorgen, dass sich aus der befruchteten Eizelle ein Individuum heranbildet, welches sich fortpflanzt. Jede genetische Variante, die solches verhinderte, würde selbstverständlich ihren eigenen Untergang betreiben. Hingegen sind die Evolutionsmechanismen gewissermaßen blind für Genwirkungen nach der fruchtbaren Lebenszeit, völlig gleichgültig, ob diese dem Organismus dann schaden oder nützen oder einfach belanglos sind. Darum können Gene oder Genvarianten, die sich nach Ende der reproduktiven Lebensphase verheerend auf den Organismus auswirken, in der Bevölkerung durchaus häufig vertreten sein – allerdings nur, wenn sie in einem jüngeren Altersabschnitt eine wichtige Funktion erfüllen. Beispielsweise wirken manche an Krebs beteiligten Gene im jungen Organismus an Wachstums- und Entwicklungsprozessen mit.

Natürlich beeinflussen sehr viele Erbanlagen die Alterung, nur geschieht dies indirekt. Das Altern ist gewissermaßen eine Randerscheinung der Prozesse, die für Wachstum und Entwicklung, für den Erhalt von Gesundheit und Lebens- ▶

kraft sorgen. Und weil kein genetisches Programm zum Altern und Sterben existiert, bietet der Alternsvorgang der Medizin keine klaren Angriffsflächen, um gegen ihn wie gegen eine Krankheit vorgehen zu können. Auch beispielsweise mit einem einzelnen genetischen Eingriff würde man bei einem so komplexen Organismus wie dem Menschen kaum einen Sieg gegen das Altern erringen. Zuviele Gene und biologische Vorgänge spielen dabei mit, die jeweils winzigste, oft nicht vorhersagbare Beiträge leisten.

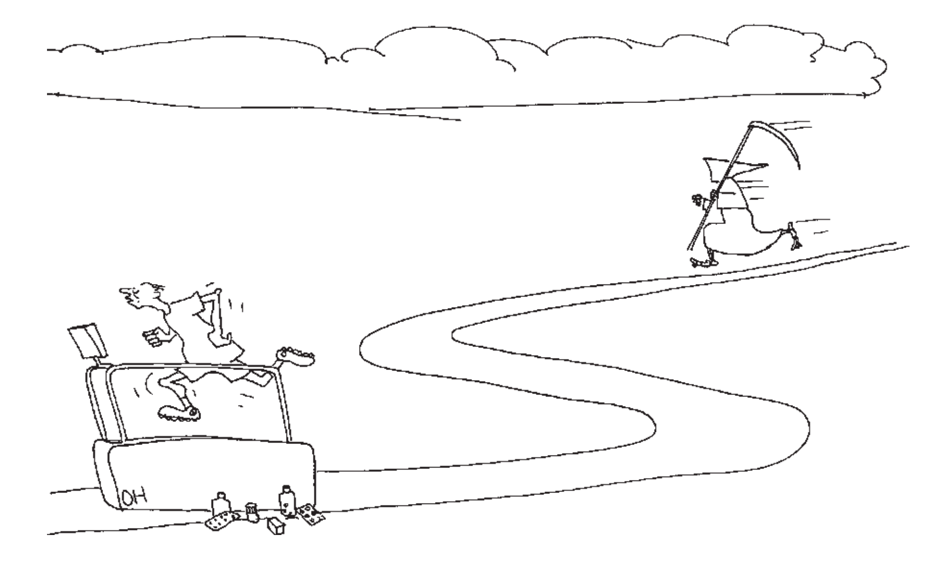
Vorsicht vor falschen Propheten

Trotzdem glauben manche Wissenschaftler, dass es ihnen irgendwann gelingen könnte, die Alterung des Menschen zu verlangsamen. Im Erfolgsfall würden viele dadurch länger leben als unter heutigen Bedingungen. Einzelne könnten sogar den derzeitigen Altersrekord von 122 Jahren brechen. Doch dieses Ziel sollte in den Forschungen nicht Vorrang haben. Nicht das Leben an sich gilt es zu verlängern, sondern die Phase gesunden Lebens. Bei hinausgeschobener Alterung würden Gebrechlichkeit und Alterskrankheiten später einsetzen – die Menschen blieben tatsächlich länger jung.

Worauf basiert unsere Behauptung, für keine der zurzeit angepriesenen Behandlungen sei die gewünschte Wirkung wissenschaftlich belegt? Um festzustellen, ob eine Maßnahme einen biologischen Vorgang beeinflusst, muss man zunächst den Prozess selbst irgendwie messen können. Doch Altern, der Alterungsgrad, lässt sich mangels Indikator bisher nicht messen. Weder bei Tieren noch beim Menschen hat sich auch nur irgendetwas gefunden, das sich dafür als geeignet erwies, kein einzelner Ablauf und auch keine verzahnten Vorgänge. Ohne einen solchen Bezug sind Aussagen über Behandlungserfolge aber schlicht nicht möglich.

Dieses Manko mögen manche Leute durchaus erkennen, denen viel daran liegt, jung zu bleiben oder sich wieder frischer zu fühlen. Wenn sie aber meinen, sie könnten schließlich nichts verlieren, indem sie trotzdem das eine oder andere Anti-Aging-Verfahren ausprobieren, so sollten sie sich das lieber nochmals überlegen. Was zum Beispiel die beliebten, vielerorts leicht erhältlichen Nahrungsergänzungsmittel angeht, so fordert etwa die Nahrungs- und Arzneimittelbehörde der USA dafür nicht dieselben strengen Sicherheits- und Wirksamkeitsprüfungen wie für Arzneimittel. Die Produkte garantieren darum weder Reinheit noch Wirkstoffgehalt, die Dosierung folgt nicht bewährten Richtlinien, und oft fehlen Hinweise auf Wechselwirkungen mit Medikamenten. In Deutschland sind zumindest die Kriterien etwa für die Einstufung als Nahrungsergänzungsmittel strenger.

Zu den beliebtesten Substanzen gegen Alterung gehören Antioxidanzien. Diese Verbindungen kommen auch natürlicherweise im Körper und in pflanzlichen Nahrungsmitteln vor. Es wird vermutet, dass sie freie Radikale neutralisieren. Verfechter empfehlen zusätzliche Gaben von Antioxidanzien, weil diese, in genügender Menge verabreicht, die aggressiven Verbindungen wegfangen sollen und so angeblich die Alterung verlangsamen oder verhindern. Nur – würden sämtliche freie Radikale abgefischt, würden wir sterben. Sie sind für Zwischenschritte biochemischer Reaktionen unter anderem bei der Zellkommunikation und bei der Immunabwehr unverzichtbar. Zudem haben epidemiologische Studien zwar erwiesen, dass die als Antioxidanzien angepriesenen Vitamine E und C das Krebsrisiko senken können, sofern sie aus Nahrungsmitteln aufgenommen werden. Gleiches ergab sich für einige andere Krankheiten, so die Makula-Degeneration, eine im Alter häufige Abbau-Erscheinung der Netzhaut. Ob jedoch Vitaminpräparate Ähnliches leisten, ob sie das Altern hinauszögern und durch freie Radikale erzeugte Schäden begrenzen, ist bisher nicht nachgewiesen.



Viel gefragt ist auch der Hormonersatz, der ebenfalls auf durchaus plausiblen Überlegungen gründet. Im frühen 20. Jahrhundert versuchte man, zum Erhalt der Manneskraft Ziegen- oder Affenhoden zu übertragen oder Hodenextrakte zu verabreichen. Heute stehen dafür wie für andere Indikationen reine Hormone zur Verfügung. Im Prinzip mag eine Hormonsubstitution bei Älteren einsichtig erscheinen. Mit zunehmendem Alter nehmen gewöhnlich die Blutspiegel der meisten dieser Stoffe ab, etwa von Melatonin, Wachstumshormon, Testosteron und Dehydroepiandrosteron (DHEA). Nachweislich wirken sich zum Beispiel Gaben von Wachstumshormon auf kurze Sicht bei älteren Männern in verschiedener Hinsicht günstig aus, besonders auf die Muskelmasse und Hautelastizität.

Hormonersatz kann das Altern nicht aufhalten

Aber zugesetzte Hormone können auch bedenkliche Nebenwirkungen haben. Verabreicht man Mäusen Melatonin, steigert dies ihr Krebsrisiko. Bringt man sie dazu, besonders viel Wachstumshormon zu bilden, treten Nierenschäden und frühes Herz- und Lungenversagen auf. Die Nager sterben vorzeitig. Bei manchen Menschen, die als Erwachsene Wachstumshormon erhielten, wuchsen äußere Körperteile, ein Akromegalie genanntes Phänomen, oder sie litten an einem Karpaltunnelsyndrom, bei dem der Unterarmnerv im Handgelenk zu sehr eingezwängt wird. Der Östrogen-Ersatz nach den Wechseljahren kann das Befinden mancher Frauen durchaus verbessern. Dennoch ist auch diese Maßnahme nicht unumstritten, weil dadurch zum Beispiel das Risiko für Brustkrebs und Thrombosen steigt. Um bestimmte altersbedingte Störungen zu behandeln, kann ein Hormonersatz durchaus angebracht sein. Dafür, dass die Hormongaben das Altern hinauszögern, bestehen allerdings keine Anzeichen.

Wie steht es aber mit gesunder Ernährung und regelmäßiger Bewegung? Die Gesundheitsorganisationen empfehlen beides dringlich. Doch verbirgt sich



CORBIS

Altern ist keine Krankheit. Durch die natürlichen Abbauprozesse erhöht sich allerdings die Anfälligkeit für bestimmte Erkrankungen.

hierin ein natürlicher Jungbrunnen? Fest steht, dass Ausgleichssport und eine vernünftige Ernährung das Risiko für viele Krankheiten herabsetzen und insofern vielen Menschen zu einem längeren und gesünderen Leben verhelfen. Dennoch müssen wir unsere Leser enttäuschen: Es gibt keinen Nachweis, dass solches Verhalten die Alterung selbst aufschiebt.

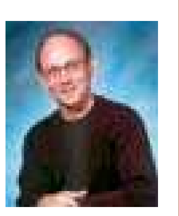
Uns erscheint es widersinnig, dass gerade in dieser Zeit, in der die Alternsforschung bedeutende Fortschritte verzeichnet, der Markt für zweifelhafte Produkte gegen das Altwerden boomt. Forschern gelang es, Hefezellen, Fadenwürmer, Taufliegen und Mäuse genetisch so zu manipulieren, dass die Organismen länger lebten. Jedoch gilt als wichtiges Merkmal des Phänomens Altern, dass in einer Population das Sterberisiko abhängig von der Zeit nach der Pubertät exponentiell ansteigt. Hierauf hatten die genetischen Eingriffe aber keinen Einfluss, sodass nicht sicher ist, ob sie wirklich den Alterungsprozess veränderten. Weitere Studien an den betreffenden Genen könnten allerdings Hintergründe der Langlebigkeit aufzeigen und somit Möglichkeiten eröffnen, Gebrechlichkeit und Alterskrankheiten hinauszuschieben.

Eine wirkliche Verzögerung der Alterung könnte aus dem Forschungsansatz einer stark kalorienreduzierten Ernährung erwachsen. Seit Jahrzehnten erproben Wissenschaftler das Verfahren an Tieren. Bei allen getesteten Arten, bis hin zu Affen, sterben die Tiere im Durchschnitt später und bleiben auch länger gesund, wenn sie mindestens ein Drittel weniger Kalorien erhalten, als sie von allein fressen würden – vorausgesetzt, sie bekommen die notwendigen Nährstoffe für die Körperfunktionen. Man darf vermuten, dass eine solche Diät auch beim Menschen in ähnlicher Weise lebensverlängernd wirken würde. Nur wird kaum jemand seine Mahlzeiten so strikt einschränken wollen. Darum untersuchen Biologen jetzt die Stoffwechselmechanismen, auf denen der Effekt beruht. Diese möchten die Forscher imitieren, sodass Menschen von der Wirkung profitieren können, ohne hungern zu müssen.

Viele Wissenschaftler bewerten die derzeitige Entwicklung der Alternsforschung optimistisch. Nach ihrer Ansicht wird es eines Tages möglich sein, den Vorgang tatsächlich zu verlangsamen. Sie rechnen auch damit, Gewebe mit noch unspezialisierten Stammzellen instand zu setzen und zu verjüngen. Doch nicht alle Forscher teilen diese Zuversicht. Ihrer Auffassung nach wird sich der Alterungsprozess wegen seiner Komplexität allen Anti-Aging-Therapien auf immer widersetzen.

Nur eines steht fest: Weltweit wächst die Zahl alter Menschen, und viele Leute suchen sich an Produkten gegen das Altern zu bereichern. Als wir zusammen mit fast fünfzig Kollegen die Stellungnahme für die Website von „Scientific American“ unterzeichneten, stellten wir im Interesse der Sache kleine Meinungsabweichungen hintenan. Nicht jeder von uns kann jeder Formulierung des Textes zustimmen, aber dies ist zweitrangig. Wir möchten die Öffentlichkeit wachrütteln. Jeder soll wissen, dass für die angeblichen Anti-Aging-Mittel und -Kuren die gewünschte Wirksamkeit wissenschaftlich nicht erwiesen ist. Dagegen können solche Produkte durchaus schaden. Es mag sein, dass die Alternsforschung einmal Behandlungen ermöglichen wird, die den unaufhaltsamen Verfall im Alter verlangsamen. Doch noch ist dieser Tag nicht in Sicht.





S. Jay Olshansky *(links) hat eine Professur für öffentliche Gesundheit an der Universität von Illinois in Chicago.* ***Leonard Hayflick*** *(Mitte) ist Professor für Anatomie an der Universität von Kalifornien in San Francisco.* ***Bruce A. Carnes*** *hat an der Universität von Chicago, an der Olshansky ebenfalls tätig ist, eine Forschungsstelle am National Opinion Research Center/Center for Aging. Alle drei sind renommierte Altersforscher. An der hier vorgestellten öffentlichen Stellungnahme von 51 Experten waren sie maßgeblich beteiligt.*

Literaturhinweis

Altern, Krebs und Gene. Spektrum der Wissenschaft, Digest 2/1998.

Golfbälle

Wie stellt man einen Golfball her, der weit und richtungsgenau fliegt? Das fragten sich schon Handwerker im Schottland des 15. Jahrhunderts, wo das Golfspiel 1457 erstmals urkundlich erwähnt wurde. In mühseliger Kleinarbeit stopften sie gekochte Gänsefedern in eine nasse Ledertasche und nähten diese zu. Beim Trocknen dehnten sich die Federn aus, während das Leder schrumpfte, und so entstand ein steinharter „Federball“. Aber selbst ein geschickter Mensch konnte davon nur vier am Tag herstellen, und so war das Spiel auf dem Golfplatz schon damals vorwiegend ein Vergnügen für reiche Leute.

Erst in den vierziger Jahren des 19. Jahrhunderts gab es eine kautschukartige Alternative: Guttapercha. Dieses stammt vom Palaquium-Baum Malaysias und Indonesiens, es dient auch heute oft noch als Kitt. Erhitztes Guttapercha ist weich und lässt sich zu einer Kugel formen. Solche Bälle waren haltbar und deutlich billiger. Merkwürdigerweise flogen neue und damit glatte Guttapercha-Bälle nicht so gerade oder so weit wie ältere mit Gebrauchsspuren. Die Ballmacher begannen deshalb, ihre Produkte einzukerben, mit Hämmern zu bearbeiten und Muster in die Oberfläche zu pressen. Die Bälle hielten danach in der Tat die Richtung besser und flogen auch weiter. Die wissenschaftliche Disziplin der Aerodynamik war jedoch noch zu jung, um solche Phänomene zu erklären.

Im Jahr 1898 entwickelten der Golfer Coburn Haskell aus Ohio und Bertram Work, ein Angestellter bei B. F. Goodrich, einem amerikanischen Reifenhersteller, den Golfball aus Gummi. Sie wanden einen Gummifaden um einen festen Gummikern und umgaben dieses Gebilde mit Balata, einer latexartigen Milch des tropischen Baumes *Mimosops balata*.

Die früheren Erfahrungen über die Flugeigenschaften brachten dem englischen Ingenieur William Taylor 1908 ein Patent für einen Ball, in dessen Oberfläche in regelmäßiger Verteilung kleine Vertiefungen (Dimples) eingekerbt wurden. Sie vermindern den aerodynamischen Widerstand und erhöhen den Auftrieb. Mit diesen Mustern wurde seither viel herumexperimentiert. Heutzutage sind etwa 400 Dimples die Regel. Erst kürzlich versuchten die Hersteller, mit zweireihigen Vertiefungen den Widerstand noch weiter zu reduzieren.

Manche Golfer beklagen, durch die bessere Technologie werde der Spieler zu stark unterstützt. Das mag für Amateure stimmen, jedoch haben sich die Anforderungen an professionelle Spieler kaum vermindert. Dazu meint Wally Uihlein von Acushnet, dem Hersteller der Marke Titleist: „Selbst Bälle und Schläger des Raumzeitalters haben bei amerikanischen Profi-Turnieren in den letzten 17 Jahren im Schnitt nur eine Verbesserung um einen Punkt gebracht.“

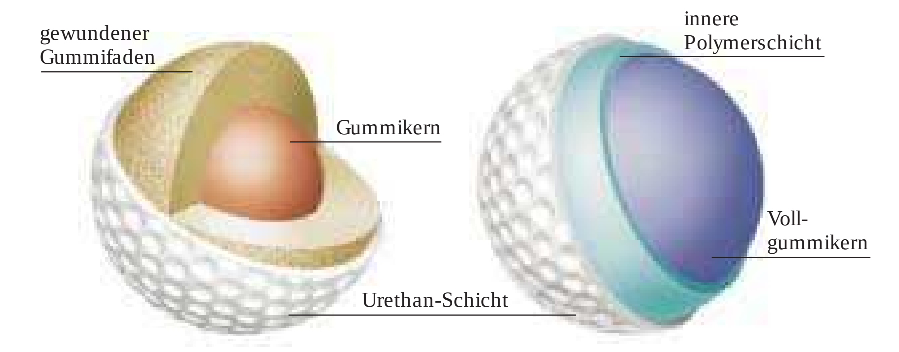
Der Autor **Mark Fischetti** *ist freier Mitarbeiter bei Scientific American.*



Ein bevorzugtes Dimple-Muster des Herstellers Titleist ist das 416-Quadrilateral-Muster.

Gummi/Kunstharz (2001)

Gummi (1898)



Die meisten modernen Bälle sind Varianten zweier Bauweisen. Entweder wird um einen kleinen, festen oder mit Flüssigkeit gefüllten Gummikern ein Gummifaden gewunden, oder ein großer Vollgummikern erhält eine dünne Polymerbeschichtung. Beide Balltypen werden oft mit einer oder mehr Schichten aus Urethan oder einem Ionomerharz wie Surlyn von Du Pont ummantelt. Einige Profis bevorzugen eine weiche Außenhaut aus synthetischer Balata, um die Eigendrehung des Balls besser kontrollieren zu können.

Wussten Sie schon … ?

➤ Um 1930 einigten sich die britischen und amerikanischen Golfverbände auf standardisierte Durchmesser und Gewichte für Turnierbälle. Demnach darf die Masse 45,39 Gramm nicht überschreiten und der Durchmesser muss mindestens 42,67 Millimeter betragen.

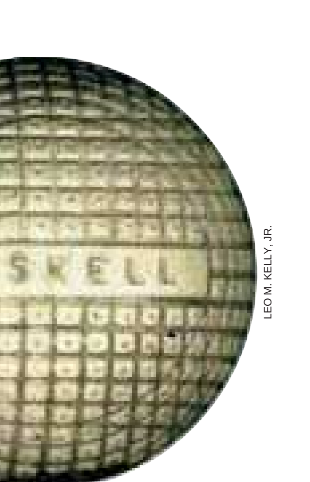
➤ Im Kampf um den Kunden werben Ballhersteller mit immer mehr Dimples. Trieben sie diese Entwicklung auf die Spitze, so ergäben Tausende von winzigen Vertiefungen wieder einen nahezu glatten – schlechten – Ball. Experten zufolge sind Bälle mit 300 bis 500 Dimples von 0,2 bis 0,3 Millimeter Tiefe optimal.

➤ Golfbälle werden mit Ziffern bedruckt, damit die Spieler einer Gruppe ihre Bälle auseinander halten können. Nicht wenige schwören darauf, dass sie einen „Top-Flite 2“ weiter schlagen können als einen „Top-Flite 5“ oder dass „Maxfli 1“ weniger nach links verzieht als die Variante 6. Ist das Aberglaube? Beim Golfspielen? Niemals!

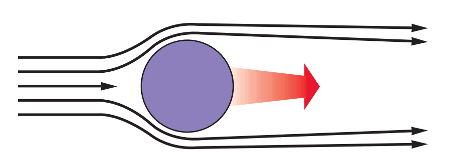
➤ Um die Haltbarkeit von Ballkern, Farbe, ja sogar des Logos zu prüfen, betreibt die amerikanische Firma Hye Precision Products eine 1,2 Tonnen schwere Luftkanone, die pro Minute zwölf Golfbälle mit einer Geschwindigkeit von nahezu hundert Meter pro Sekunde auf eine gehärtete Stahlplatte feuert.

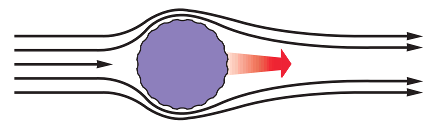
➤ Das ursprünglich schottische Nationalspiel gelangte im Jahr 1608 nach England und wurde dort im 19. Jahrhundert sehr populär. Der erste deutsche Golfklub wurde erst 1895 in Berlin gegründet.

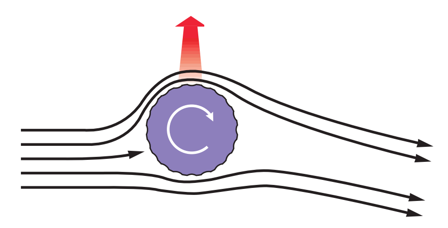
➤ Die Sprache des Golfsports ist englisch. So bezeichnet ein Hook eine nach links, ein Slice eine nach rechts weisende und durch einen Drall des Balls gekrümmte Bahn. Gerade Bahnen mit wenig Drall heißen Pull beziehungsweise Push.



LEO M. KELLY, JR.


Zum Luftwiderstand eines Golfballs trägt ein „Zug“ gegen die Flugrichtung bei. Der ist Folge einer Differenz zwischen dem Luftdruck vorne am Ball und dem Unterdruck, der hinter ihm entsteht.


Vertiefungen (Dimples) verursachen in einer dünnen Luftschicht am Ball Turbulenzen. Die Luft strömt hinter dem Ball enger zusammen, der Unterdruck beziehungsweise Luftwiderstand wird schwächer.


Trifft der Schlägerkopf auf den Ball, überträgt er je nach Winkel einen Drehimpuls gegen die Flugrichtung (Backspin). Der lenkt den Luftstrom nach unten, so wie das auch ein abgewinkelter Flugzeugflügel tut. Es resultiert eine aufwärts gerichtete Gegenkraft – der Auftrieb.


LEO M. KELLY, JR.

Guttapercha-Ball mit Dimples (ca. 1890)

LEO M. KELLY, JR.

mit Federn ausgestopfter Lederball (Ende 15. Jahrhundert)


ILLUSTRATIONEN: GEORGE RETSECK

Wir laden unsere Leser herzlich ein, zu dieser Rubrik beizutragen. Themenvorschläge senden Sie bitte an: **linsmeier@spektrum.com**





ARCHÄOLOGIE

In Sibiriens Tal der Könige

Sie waren einst Fürsten der eurasischen Steppen. Heute zeugen nur hunderte Grabhügel von der Kultur der Skythen. Archäologen aus Deutschland und Russland forschen nach den Ursprüngen der kriegerischen Nomaden in der sibirischen Steppe.

PANTHER: HERMANN PARZINGER; LANDSCHAFT: DAI

Von Hermann Parzinger

Nomaden, die Pferdeherden durch die Steppen Europas und Asiens trieben, die Milch der Stuten tranken und als kriegerisches Reitervolk Schrecken verbreiteten – wer denkt da nicht an Hunnen oder Mongolen. Doch schon bald nach 1000 v. Chr. hatten die weiten Steppengebiete Innerasiens solche Völker hervorgebracht, Kimmerier, Arimaspen und die schon in der Antike legendären Skythen.

Den Namen dieses Volkes hat uns der griechische Historiker Herodot (etwa 485–424 v. Chr.) überliefert. Demnach beherrschten die Skythen im 5. Jahrhundert v. Chr. die Steppen nördlich des Schwarzen Meeres in der Ukraine sowie in Südrussland und sollen ursprünglich aus dem heutigen Sibirien stammen. Dort nennen sie die Forscher mitunter nach dem ersten Fundort entsprechender Artefakte auch Tagar – ein Indiz dafür, dass bis heute niemand recht weiß, welche Ethnien zu diesem Kulturkreis gehörten. Wenn Archäologen von Skythen sprechen, meinen sie denn auch etwas vage Nomaden der frühen Eisenzeit (9./8. bis 3. Jahrhundert v. Chr.), die eine Kultur der Reiterkrieger ausgebildet hatten, um große Viehherden und Weidegebiete zu verteidigen. Zu diesem Zweck hatten sie auch den so genannten Reflexbogen erfunden, der zielgenaues Schießen vom galoppierenden Pferd aus gestattete. Dreiflügelige Spitzen aus Bronze und Eisen verliehen ihren Pfeilen besondere Durchschlagskraft. Metallenes Schirrungszubehör und speziell gefertigte Sättel halfen, die Pferde im Reiterkampf besser zu beherrschen (der Steigbügel wurde erst später erfunden).

Nicht nur Waffen und Reittechniken zeichneten die Skythen und andere – noch namenlose – Reiternomaden jener Zeit aus, sie pflegten auch eine auffallende künstlerische Ausdrucksform, den so genannten skythischen Tierstil: In teils sehr naturalistischen, teil aber auch abstrahierten Darstellungen wilder Tiere sollten sich vermutlich übernatürliche Kräfte manifestieren und ihren Träger schützen. Häufige Motive waren Hirsche, Pferde, Eber, Panther und andere Raubtiere, zudem Mischwesen wie Greife oder geflügelte Pferde. Ein typisches Element sind so genannte Rolltiere, meist Panther oder andere Raubtiere, die so nach innen eingerollt sind, dass das Maul annähernd den Schwanz erreicht. Es entstanden Symbole, die über Generationen überliefert wurden und auch vom gesellschaftlichen Rang ihrer Träger zeugten, insbesondere wenn es sich um in Goldblech gearbeitete Tierfiguren handelte. Dementsprechend zierten diese Motive lediglich die für Nomaden wichtigen beweglichen Objekte wie Waffen, Kleidung, Trachtzubehör und Pferdegeschirr. Darüber hinaus waren mitunter auch Leib und Glieder tätowiert.

Herodots Berichte über die Skythen dürften die Griechen sehr interessiert haben, berührten ihre Kolonien entlang der nördlichen Schwarzmeerküste doch skythisches Hoheitsgebiet. An den Getreideexporten aus den Kolonien hing das Wohlergehen der Mutterstädte. Griechisch anmutende Schmuckstücke in Grabhügeln der Reiterfürsten legen die Vermutung nahe, dass zumindest kunstfertige Handwerker in den Siedlungen in der Steppe gern gesehen waren.

Herodot, der „Vater der Geschichtsschreibung“, notierte, was er über die Skythen vernommen hatte. Besonders bemerkenswert erschien ihm offensichtlich ein für die eurasischen Reiternomaden charakteristisches Brauchtum, das er deshalb an den Anfang seiner Beschreibung stellte: das Stutenmelken. Während die Tiere gemolken werden, so der Historiker, blase man ihnen mit einem Rohr in die Scheide, um das Euter zur Milchabgabe zu reizen. Die Milch würde da-



In der Steppe des Minusinsker Beckens markieren Hunderte von Ecksteinen Grabstätten der Skythen. Nur selten finden Archäologen in den meist ausgeraubten Gräbern noch Artefakte wie den goldenen Panther links oben. Tierbilder symbolisierten magische Kräfte und sollten vermutlich ihre Träger vor Bösem schützen.

rauf in Holzgefäßen von geblendeten Sklaven so lange gerührt, bis sich eine obere Schicht absetzt. Darüber hinaus berichtet Herodot etwa über den Brauch, Anführer mit all ihrem Reichtum in Grabkammern unter mächtigen Hügeln, den so genannten Kurganen, beizusetzen; ihre Frauen, Diener und Pferde wurden getötet und mitbestattet.

Völkerwanderung in der Eisenzeit

Ihm und anderen antiken Autoren ist es zu verdanken, dass wir Einzelheiten aus dem im Altertum viel gelesenen Epos „Arimaspeia“ des Aristeas von Prokonnesos aus dem späten 7. Jahrhundert v. Chr. kennen. Das verloren gegangene Werk berichtet von einer Reise des Aristeas durch das Land der Skythen nördlich der Schwarzmeerküste zum Volk der Issedonen weiter östlich davon.

An deren Herrschaftsgebiet habe sich das der einäugigen Arimaspen angeschlossen, und dahinter wiederum wohnten die Gold hütenden Greife, die Archäologen und Historiker dann schon tief in Sibirien lokalisierten, obgleich hier die Grenze zum Reich der Mythen und Fabeln wohl überschritten wurde. Kämpfe zwischen beiden Völkern dienten griechischen Künstlern als beliebtes Motiv, wobei sie die Arimaspen oft als Männer in typischer Steppentracht darstellten, mit Kaftan und langer Hose, häufig mit ihren Pferden.

Dass der Mythos einen harten geschichtlichen Kern hatte, wissen wir wieder durch Herodot: Die Arimaspen hatten durch ihre Eroberungszüge in der frühen Eisenzeit eine eurasische Völkerwanderung in Gang gebracht, als deren Ergebnis Völkerschaften wie Skythen und Kimmerier überhaupt erst den Kulturen Alteuropas bekannt wurden. Zunächst sollen sie die Issedonen aus ihren ursprünglichen Wohnsitzen vertrieben und in das heutige Sibirien abgedrängt haben. Dort lebten wiederum die Skythen, die nun in den nördlichen Schwarzmeerraum zogen und die Kimmerier zur Abwanderung über den Kaukasus nach Vorderasien zwangen.

Altorientalische Quellen berichten über das Vordringen nördlicher Reiterkrieger über den Kaukasus nach Vorderasien. So werden in den assyrischen Annalen der Zeit Sargons II. (721–705 v. Chr.) die als Gimirru bezeichneten Kimmerier als Gegner des Reiches von Urartu genannt, dessen König Rusa sich im Angesicht seiner Niederlage den Tod gibt. Im 7. Jahrhundert v. Chr. fielen nach griechischen Schriften dem „Kimmeriersturm“ zahlreiche Städte an der Küste Ioniens, der heutigen Westtürkei, zum Opfer. Dazu passt ein assyrischer Bericht, wonach der Assyrerkönig Asarhaddon (681–669 v. Chr.) 677 v. Chr. den Kimmerierfürsten Teušpa an der Grenze nach Kleinasien besiegte. Doch bis zum Ende des 7. Jahrhunderts stellten die Eindringlinge eine Gefahr dar.

Den Kimmeriern folgten die Skythen laut Herodot über den Kaukasus nach Süden, wo sie dann zunächst den Untergang des Reiches von Urartu bewirkten, ehe sie sich Richtung Südosten in das Gebiet der Meder wagten. Sie hielten sich dort rund ein Jahrhundert auf, stellten ihre Kampfkraft mal Assyrien, mal Medien zur Verfügung, kämpften mitunter auf eigene Faust und errangen zeitweise die Herrschaft über Teilgebiete. Der Aufstieg Mediens zur beherrschenden Macht im heutigen Westiran setzte dem ein gewaltsames Ende: Der medi-

sche König Kyaxares lud die skythischen Anführer um 616 v. Chr. zu einem Gelage ein und ließ sie ermorden. Ihrer Führung beraubt, zogen die Nomaden nach Norden, die meisten, wie wieder Herodot berichtet, an die nördliche Schwarzmeerküste, wo sie sich endgültig niederließen.

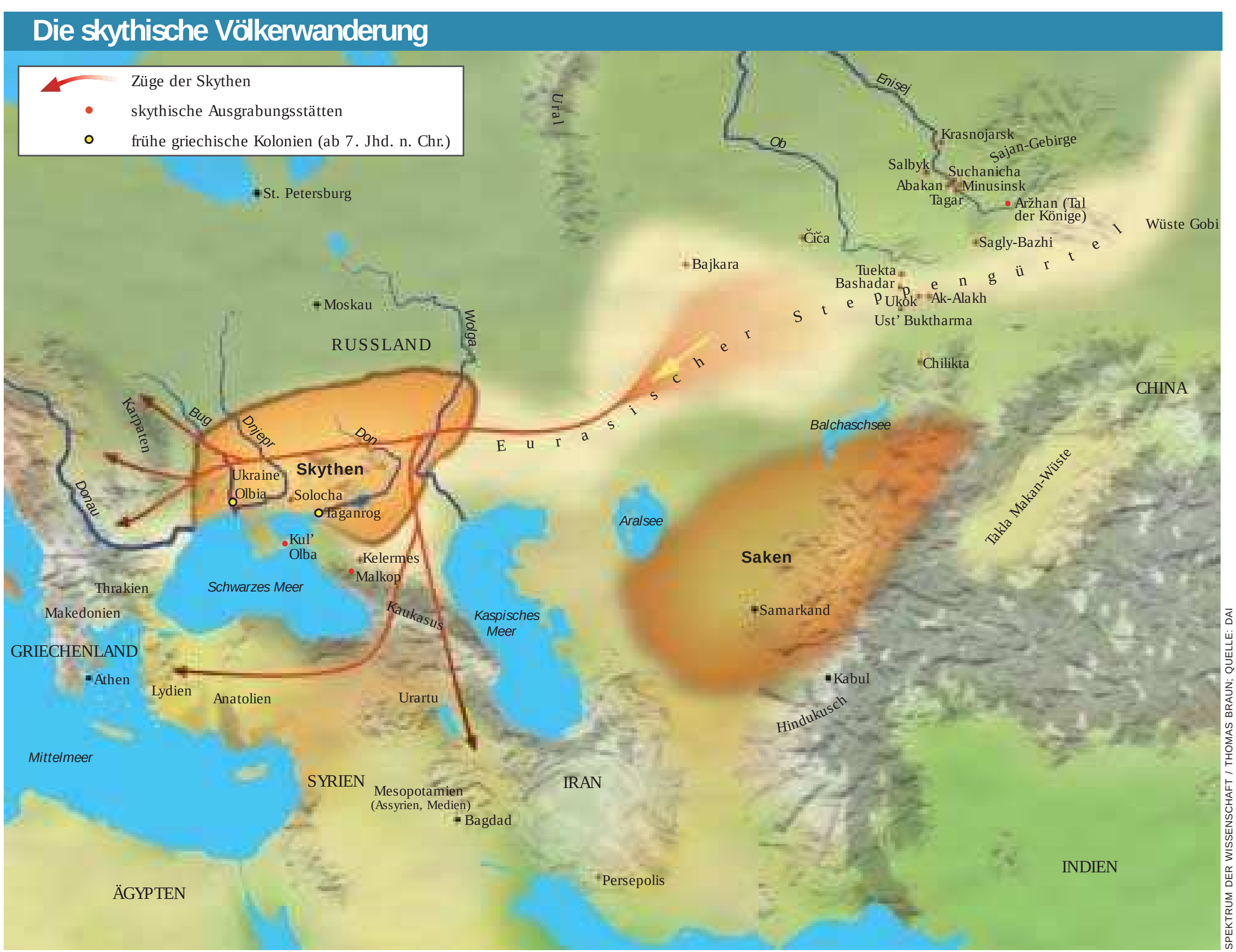
Von Sibirien über den Kaukasus nach Vorderasien und von dort an das Schwarze Meer, so wanderten die Skythen laut Herodot durch die Welt der frühen Eisenzeit. Sein Bericht bewog russische Forscher des 20. Jahrhunderts, die ältesten skythischen Funde in jenem Raum auf das ausgehende 7. und frühe 6. Jahrhundert v. Chr. zu datieren. Dazu gehören die reichen Goldfunde aus den Kurganen von Kelermes im Nordwestkaukasus und auch die ältesten skythischen Pfeilspitzen, Pferdegeschirrteile und Tierstilzeugnisse des Nordschwarzmeergebietes.

Offensichtlich hatten aber nicht alle Stämme dieses Volkes den geschilderten Weg eingeschlagen. Aus Mittelasien attackierten persischen Texten zufolge im 6. Jahrhundert v. Chr. die dort als Saken bezeichneten Skythen die Nordgrenze des Perserreiches. Dem Begründer dieser Achämeniden-Dynastie, Kyros dem Großen (559–528 v. Chr.), gelang die Sicherung der Grenze, Perserkönig Dareios der Große (522–486 v. Chr.) unterwarf schließlich die Angreifer. Auf den Reliefs der Hauptstadt Persepolis zollen skythische Abgesandte dem persischen Großkönig anlässlich des Neujahrsempfangs Tribut. Doch Dareios wollte mehr: Im Jahre 512 v. Chr. versuchte er vom thrakischen Balkan-Donauraum her auch das Gebiet der Skythen nördlich der Küsten des Schwarzen Meeres zu erobern. Er scheiterte – und inspirierte Herodot zu seiner Schilderung.

Die schriftliche Überlieferung Griechenlands und des Alten Orients bietet also eine Fülle an Informationen über die Kultur der skythischen Reiterkriegernomaden im 1. Jahrtausend v. Chr. Ihre von Herodot vermuteten Ursprünge im Gebiet der „Gold hütenden Greife“ hingegen, also in den Steppenregionen weit östlich des Urals bis tief nach Innerasien hinein, bleiben im Dunkel der Mythologie. Diese Lücke zu schließen ist eine Aufgabe für Archäologen. Allerdings keine einfache, denn auch heute noch stellt die Arbeit in Sibiren hohe Ansprüche. Mitte Mai, wenn oft noch der letzte Schnee fällt, beginnt die Arbeit, denn der Boden ist nun nicht mehr gefroren. Zelte bieten Schutz gegen Nachttemperaturen von minus fünf Grad, tagsüber wird es im Sommer bis dreißig Grad heiß. Die Körperpflege erfolgt im Fluss, die Verpflegung ist ebenso schlicht wie eintönig. Anfang September, in höher gelegenen Regionen wie dem Altaj-Gebirge schon vorher, heißt es schließlich Abschied nehmen von der Forschungsstätte, denn die Tage werden dann recht kurz.

Deutsche Wissenschaftler haben die archäologische Erforschung Sibiriens

Die skythische Völkerwanderung



Nomaden, die einander den Lebensraum streitig machten, haben vermutlich schon in der frühen Eisenzeit eine Völkerwanderung ausgelöst: Arimaspen und Issedonen sollen die Skythen aus Sibirien vertrieben haben. Dargestellt ist deren Zug ans Schwarze Meer sowie über den Kaukasus nach Anatolien und Mesopotamien. Persischen Berichten zufolge bedrohten sie als „Saken“ auch das Großreich der Achaimeniden, doch sind Wanderungsweg und Ausbreitung dort noch unklar.

HERMANN PARZINGER



Handel zwischen Griechen und Skythen gehörte wohl zum Alltag: Diesen Spiegel (abgebildet ist die reich verzierte Rückseite) fanden Archäologen in einem skythischen Grabhügel bei Kelermes an der Schwarzmeerküste, doch hergestellt wurde er in einer griechischen Werkstatt in der kleinasiatischen Kolonie Ionien. Dargestellt ist auch der Kampf zweier Arimaspen mit einem Greif (oben links).

seit den Anfängen zur Zeit Peters des Großen (1672–1725) begleitet. Anlässlich der Geburt eines Sohnes im Jahre 1715 erhielt der Zar von dem Unternehmer Nikita Demidovals als Geschenk 100000 Rubel sowie mehrere tierförmige Goldscheiben (sie gehören noch heute zum Kern der Schatzkammer der St. Petersburger Ermitage). Russische Siedler betätigten sich als Grabräuber und plünderten die Schätze aus sibirischen Grabhügeln. Das Interesse des Zaren war geweckt, versprachen die Altertümer doch reiche Erzvorkommen im Ural und östlich davon. Sie auszubeuten fehlten Russland die Fachleute; denn die Zaren vor Peter dem Großen hatten es von Europa isoliert. Dieser lud daraufhin ausländische Naturwissenschaftler ein, auf mehrjährigen Expeditionen die Naturschätze Sibiriens zu erforschen, gleichzeitig aber auch Land und Leute zu erkunden.

Und so begaben sich Trupps aus Soldaten, Malern, Jägern, Bergleuten, Forschern und Landvermessern hinaus in die Wildnis. Viele erlagen der Verlockung, einen der großen Grabhügel, Kurgane, der Skythenzeit zu öffnen, dessen Alter sie nicht kennen konnten. Zu ihnen gehörte auch der Deutsche Gerhard Friedrich Müller, ein Universalgelehrter, der im Dienste des Zaren das Gebiet zwischen Enisej und Bajkalsee erkundete. Er machte nicht nur reiche Beute in einigen Grabhügeln, sondern versuchte auch als Erster, sie zu datieren. Das brachte ihm ein Jahrhundert später den Titel „Vater der sibirischen Archäologie“ ein, verliehen von Friedrich Wilhelm Radloff, einem weiteren Deutschen im Dienst der Petersburger Akademie der Wissenschaften. Dieser forschte in den sechziger Jahren des 19. Jahrhunderts in Sibirien.

Radloff begann unter anderem mit ersten Untersuchungen in so genannten Eiskurganen in der Permafrostzone des Altaj-Hochgebirges. Das waren Grab- ▶



In dieser mit gelbem Steppengras bewachsenen Hochterrasse oberhalb eines Seitenarms des Enisej liegt das Gräberfeld von Suchanicha. Im Hintergrund rechts der Berg Tepsej, dahinter der Oglachty. Das Gräberfeld wurde über Jahrtausende hinweg immer wieder genutzt. Viele Bestattungen gehören in die Spätbronzezeit, die der skythenzeitlichen Tagar-Kultur unmittelbar vorangeht. Typisch für diese Grabanlagen sind die umgebenden, rechteckigen Steinsetzungen (kleines Bild).

kammern unter Hügeln, in deren Holzsärgen sich schon bald nach der Beisetzung Wasser sammelte, das zu einer Eislinse gefror und so den Verstorbenen samt Bekleidung und Grabbeigaben konservierte. Dass den Toten vor der Bestattung ihre Gedärme entfernt wurden, lässt den Schluss zu, dass die Skythen um die mumifizierende Wirkung in der Dauerfrostzone der Hochgebirge sehr wohl wussten. Radloff begründete da-mit eine Forschungstradition in dieser wichtigen Fundregion Innerasiens, die berühmte russische Gelehrte wie Sergej Rudenko und Michail Grjaznov sowie neuerdings Vjaèeslav Molodin und Natalija Polos'mak fortsetzten.

Weniger freiwillig als alle zuvor Genannten kam Gero von Merhart in den Osten Eurasiens. Der Erste Weltkrieg führte ihn 1914 in russische Gefangenschaft, die er in verschiedenen sibirischen Lagern verbrachte. Im Jahre 1919 gelangte von Merhart schließlich als Restaurator ins Museum der Geographischen Gesellschaft in Krasnojarsk. Er beaufsichtigte bald die dortige urgeschichtliche Sammlung und unternahm zusammen mit russischen Gelehrten auch kleinere Ausgrabungen am Enisej zwischen Krasnojarsk und Abakan. Als die deutschen Kriegsgefangenen 1920 zurück in die Heimat durften, verlängerte von Merhart trotz der Bürgerkriegszeit seinen Sibirien-Aufenthalt für ein Jahr, um die Arbeit zu Ende zu führen.

Ihm gelang es erstmals, die materielle Kultur der Skythen in Südsibirien umfassend zu beschreiben und gleichzeitig auch die Entstehung dieser Funde aus lokalen bronzezeitlichen Vorläufern zu erklären. Seither gilt als ausgemacht, dass die mit den Skythen verwandte Tagar-Kultur Südsibiriens sich auch dort herausgebildet hatte.

Schatzjäger des Zaren

Von Merhart konnte seine erfolgreichen Forschungen in Sibirien jedoch nicht fortsetzen. Stalinistische „Säuberungsaktionen" ließen wissenschaftliche Kontakte mit dem Ausland zur tödlichen Gefahr werden, mit dem Zweiten Weltkrieg riss die Verbindung endgültig ab. Erst die Auflösung der Sowjetunion und die Entstehung souveräner Staaten im östlichen Europa und in Mittelasien haben den eisernen Vorhang auch für Archäologen wieder gehoben.

Wenn es sich ein Schatzjäger zur Zeit Peters des Großen aussuchen konnte, dann wählte er wohl das im südlichen Sibirien gelegene Minusinsker Becken als Arbeitsgebiet, eine Steppenlandschaft zu beiden Seiten des Enisej zwischen westlichem Sajan-Gebirge im Süden und der heutigen Stadt Krasnojarsk im Norden. Dieses Gebiet war während der russischen Aufsiedlung von dem turksprachigen Volk der Chakassen bevölkert und ist auch heute wieder als autonome Republik Chakassien Teil der Russischen Föderation. Abertausende von Kurganen verschiendener Epochen, von der Jungsteinzeit bis zum Hochmittelalter, zeugen von der starken Anziehungskraft dieser Beckenlandschaft.

Wie eine Laune der Natur oder ein Geschenk ihrer Götter muss es seinen Bewohnern erschienen sein: Von unwirtlicher Taiga und schroffen Bergen umgeben, bietet das Becken fruchtbare Böden und so viele Sonnentage, dass im Sommer sogar Tomaten gedeihen (manche bezeichnen es deshalb als „sibirisches Italien"). Schon vor Jahrtausenden verliefen Fernwege über das Gebirge in die Mongolei und bis nach China.

Als Sibirien auf Geheiß des Zaren nach und nach in Besitz genommen wurde, durchstreiften Beamte, Händler, Offiziere und andere Schatzjäger das Becken, um Bronze- sowie Goldpreziosen aus den Gräbern zu rauben. Ein schwungvoller Antikenhandel entstand, und heute gibt es wohl kein namhaftes

archäologisches Museum auf der Welt, das keine „Minusinsker Bronzen“ besitzt. Im Jahre 1877 schließlich gründete Nikolaj Mart’janov, als Apotheker in die kleine Stadt Minusinsk versetzt, dort ein Heimatmuseum, das bis heute eine der reichsten Sammlungen sibirischer Altertümer umfasst, darunter mehr als 9000 Bronzen aus Kurganen der Tagar-Kultur, wie die Skythen hier im Becken genannt werden. Diese wertvollen Funde werden derzeit von Experten des Kreismuseums Minusinsk und der Eurasien-Abteilung des Deutschen Archäologischen Instituts gemeinsam bearbeitet und zur Publikation vorbereitet.

Die meisten dieser einmaligen Stücke wurden aus dem Boden gepflügt oder stammen aus beraubten Kurganen, doch Mart’janov befragte die Finder hartnäckig und verzeichnete minutiös alle Angaben zum Fundort. Vielfach gelang es ihm sogar, Grabinventare zu rekonstruieren, für den Archäologen heute ein unschätzbarer Fundus an Informationen. Was von der im Minusinsker Becken entstandenen Kultur tatsächlich weiter nach Westen bis in den Nordschwarzmeerraum gelangte und vieles mehr hoffen wir Archäologen aus der Untersuchung der Bronzen zu lernen.

Ein weiteres Kooperationsprojekt begann 1995: Die systematische Ausgrabung eines Gräberfeldes, auf dem über Jahrtausende hinweg kontinuierlich bestattet wurde, und das damit ideale Voraussetzungen bietet, die Kulturentwicklung von der Sesshaftwerdung und ersten Metallnutzung des Menschen bis zur Tagar-Kultur zu erforschen. Dort, wo der Fluss Tuba in den Enisej mündet, boten sich viele Gelegenheiten dafür. Vier Berge umgeben diesen Bereich, in deren Felswände unzählige Darstellungen von Menschen und Tieren, Jagdszenen und andere kultische Bildern eingemeißelt wurden. Auf den Terrassen unterhalb dieser heiligen Berge erstrecken sich ausgedehnte Gräberfelder.

Die Nekropole von Suchanicha liegt dort auf dem linken Hochufer des Enisej, etwa 35 Kilometer nördlich von Minusinsk. Sie umfasst mehr als zwölf Hektar Fläche. Noch heute sichtbare Reste von Grabanlagen ließen uns vermuten, dass die ältesten Turgane im 4. oder 3. Jahrtausend v. Chr. errichtet worden waren, die jüngsten in der Skythenzeit. Probegrabungen bestätigten diese Annahme. Da nicht daran zu denken war, eine solch große Fläche vollständig freizulegen, begannen wir – erstmals in Sibirien – mit geomagnetischen Prospektionsmessungen. Die Geophysiker Helmut Becker und Jörg Faßbinder vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in München gingen mit hochempfindlichen Magnetometern systematisch das Gelände ab. Geringe Abweichungen des Erdmagnetfeldes wurden erfasst und daraus auf nahe der Oberfläche gelegene, doch dem Auge nicht sichtbare Strukturen geschlossen (Spektrum der Wissenschaft, 11/2000, S. 90). Die Kollegen lieferten uns einen nahezu vollständigen Plan des Gräberfeldes, was Grabungen an ausgewählten Flächen ermöglichte. Unser besonderes Interesse galt dabei dem Wandel von der Spätbronzezeit zur Skythen- beziehungsweise Tagar-Kultur.

Eine der Fragen, die wir in Suchanicha klären wollen, lautet: Unter welchen Einflüssen und zu welchem Zeitpunkt hat sich der Tierstil in Südsibirien herausgebildet? Dutzende von spätbronze- und tagarzeitlichen Gräbern mit reichen Beigaben an Bronzewaffen, Bronzeschmuck und Keramikgefäßen weisen diesen Ort als ideal aus, um den Übergang von der Kultur der späten Bronzezeit (Karasuk genannt) zur skythenzeitlichen Tagar-Kultur zu erforschen. Dabei zeigt sich, dass ihre materielle Seite kontinuierlich aus der lokalen Spätbronzezeit heraus entstanden war: Dies wird an den Dolchen und Messern ebenso sichtbar wie bei der Keramik und den Tierstilobjekten.

Bei der Datierung der Entwicklungsschritte hilft eine dichte Serie von Radiokarbondaten sowohl gefundener Knochen Verstorbener als auch von Hölzern der Grabeinbauten. Demnach herrschte die Karasuk-Kultur in der zweiten Hälfte des 2. Jahrtausends v. Chr., doch spätestens im 9./8. vorchristlichen Jahrhundert hat die Tagar-Kultur sie abgelöst. Dieser Befund steht im Gegensatz zur bisherigen sowjetischen beziehungsweise russischen Forschungsmeinung, denn beide Kulturen galten bislang als ▶



Ein Volk der Skythen hat es wohl nicht gegeben, jedoch eine Kultur, die sich von anderen unterschied. Dazu gehörten auch die Reiterkrieger, die mit Pfeil und Bogen als Fernwaffen bewaffnet waren. Sie hatten eine Schirrung entwickelt, die es erlaubte, das Pferd besser als bislang möglich zu beherrschen. Diese Männer schützten Herden und Weidegrund und sicherten damit die Lebensgrundlage ihrer Gemeinschaft.

ARCHÄOLOGISCHES LANDESMUSEUM SCHLESWIG / M. GORELIK





Den bislang reichsten Goldfund entdeckten der Autor und seine Kollegen im Fürstengrab Aržan 2. Über 9300 Goldobjekte waren dem Mann (rechts) und der Frau (links) bei der Doppelbestattung beigegeben worden. Einstmals trugen sie Kaftane, die mit Tausenden goldener Pantherfiguren verziert waren (Detailfoto).

etwa 200 Jahre jünger. Wir gehen davon aus, dass der erwähnte Bericht vom Gemetzel skythischer Heerführer am Hofe des medischen Königs Kyaxares um 616 v. Chr. und dem darauf folgenden Abzug der skythischen Heerscharen in den Nordschwarzmeerraum das früheste Auftauchen reiternomadischer Funde dort korrekt auf die erste Hälfte des 7. Jahrhunderts v. Chr. datiert; demnach muss offensichtlich alles, was Herodot und andere Zeitgenossen den Skythen zuschreiben, in Südsibirien schon wesentlich früher entstanden sein.

Die bislang ältesten Funde dieser Kultur stammen aus einer Region, die südlich des Minusinsker Beckens liegt und durch das westliche Sajan-Gebirge von ihm getrennt ist. Tuva (offizielle, nicht-russische Schreibweise: Tyva) ist eine autonome Republik innerhalb der Russischen Föderation; es liegt unmittelbar vor der Nordgrenze der Äußeren Mongolei. Wo die Wege zur Überwindung dieses Gebirgszuges ansetzen, erstreckt sich entlang des Ujuk, einem Nebenfluss des Enisej, eine große Ebene. Dort, in der Umgebung des Ortes Aržan, liegt eine der beeindruckendsten skythischen Grabhügelnekropolen Eurasiens. Nicht umsonst gilt dieser Platz im Volksmund als *dolina carej* – als „Tal der Könige“. Wohl kaum ein vorgeschichtlicher Friedhof weist derartig viele monumentale Kurgane auf, deren Gesamtzahl – nimmt man die im Gelände nicht mehr ohne weiteres, auf Luftbildern aber deutlich sichtbaren hinzu – mehrere tausend betragen dürfte. Einstmals dürften die Menschen von weither nach Aržan gekommen sein, um ihre Toten zu bestatten und die damit verbundenen Rituale zu vollführen.

Steineres Monument in der Steppe

Aufsehen erregten Entdeckungen des russischen Archäologen Michail Grjaznov in der Fachwelt schon in den 1970er Jahren, als er einen Kurgan von über hundert Meter Durchmesser und drei bis vier Meter Höhe freilegte (er wird als Kurgan Aržan 1 bezeichnet). Ungewöhnlich an diesem Grabhügel war, dass er nicht – wie von Sibirien bis Osteuropa üblich – aus Erde aufgeschüttet oder aus Rasensoden errichtet worden war; seine Erbauer hatten den Kurgan vielmehr aus Steinplatten aufgeschichtet. Diese Steinplattform bedeckte eine bis heute einzigartige Holzkonstruktion, in der rechteckige bis trapezförmige Kammern in mehreren Reihen kreisförmig um das Zentrum herum angelegt waren. Dadurch erhielt die ganze Anlage ein radartiges Aussehen. Das Zentralgrab muss einstmals reich ausgestattet gewesen sein, war allerdings schon ausgeraubt. Grjaznov fand aber Teile einer bronzenen und knöchernen Bewaffnung sowie Pferdeschirrung. Dolche, Pfeilspitzen, Streitpickel, widderbekrönte Knäufe und Schirrungszubehör stammen nach heutigem Verständnis aus den Anfängen der Skythen-Kultur. Bemerkenswert waren bronzene Trensen, die im Nordschwarzmeerraum schon vor den Skythen verbreitet waren. Wie das Gräberfeld Suchanicha dürfte auch dieser Kurgan älter sein als die Herodot bekannte Kultur.

Aus diesem Grund begannen auch wir in Aržan zu graben. Dabei suchten wir insbesondere Steinplattformen – vielleicht waren das typische Denkmäler der frühesten Skythen-Zeit. Doch es gab nur drei weitere solche Kurgane, von denen wiederum zwei durch mehrere große Raubtrichter fast vollständig zerstört waren. Wir entschlossen uns daher, die dritte und ganz im Osten der Ebene gelegene Steinplattform zu erforschen (Aržan 2), obwohl auch sie nicht unversehrt war. Die Grabungen begannen im Jahre 2000 und werden gegenwärtig als Gemeinschaftsprojekt mit der Staatlichen Ermitage in St. Petersburg fortgeführt, das von russischer Seite von unserem Kollegen Konstantin Èugunov geleitet wird.

Kleinere, nur wenige Quadratmeter große Probeschnitte in dem achtzig Meter durchmessenden und zwei bis drei Meter hohen Kurgan bereiteten die Grabung vor. Dabei ergab sich, dass hier Holzeinbauten fehlten, der Hügel war vollständig aus Steinplatten aufgeschichtet worden.

Eine davon trug bemerkenswerte Darstellungen: Tierfiguren von Steinbö-

DAI



So könnte ein Heiligtum der Skythen ausgesehen haben, das bei Bajkara im heutigen Nordkasachstan ausgegraben worden ist. Der Kegel aus gebranntem, rötlichem Lehm-Sand-Gemisch dürfte in der Steppe weithin leuchtend sichtbar gewesen sein.

cken, Panthern, Hirschen und Bären gehörten ebenso wie zwei als Bogenschützen dargestellte männliche Wesen in ihrer stilistischen Ausführung noch zur bronzezeitlichen Felsbildkunst des 2. Jahrtausends v. Chr. Alle diese Figuren überragte ein bärenähnliches Raubtier, das mit seinem aufgerissenen Maul, der spitz nach vorne gestreckten Zunge und den deutlich wiedergegebenen Klauen klare Bezüge zur Kunst der bronzezeitlichen Okunev-Kultur Südsibiriens erkennen lässt.

Überraschend ist nun aber, dass in sein Hinterteil ein schematisches Rolltier eingearbeitet ist, also ein typisches Motiv des skythischen Tierstils. Dargestellt ist auch ein Hirsch im so genannten Stehenspitzengang, der ebenfalls als Merkmal des frühskythischen Tierstils gilt. Auch Funde aus Kurgan Aržan 1 tragen diese Eigentümlichkeit. Diese Steinplatte bildet gewissermaßen ein *missing link* zwischen bronzezeitlicher Felsbildkunst und beginnendem skythischem Tierstil.

Ob dieser bemerkenswerte Fund allerdings tatsächlich zum ursprünglichen Inventar des Grabhügels gehörte oder erst in späterer Zeit eingebracht wurde, war keineswegs klar. Denn die ursprüngliche Anordnung der Steinplatten war dort offensichtlich nachträglich verändert worden.

Im Jahr darauf brachten Ausgrabungen ein intaktes Fürstengrab der jüngeren Skythenzeit zum Vorschein. In einem mit Erde und Steinen verfüllten Schacht stießen wir in etwa drei Meter Tiefe auf die Balkenabdeckung einer Grabkammer, die sorgfältig aus Steinblöcken errichtet worden war, einen Boden aus Holzbohlen aufwies und ihrerseits in einer größeren, äußeren Kammer stand.

Goldschatz im Skythengrab

Wir fanden die Überreste eines Mannes und einer Frau, offensichtlich Herrscher ihrer Zeit: Ihr Oberkleid bestand jeweils aus einer Art Kaftan, auf den Tausende von goldenen Panthern aufgenäht waren, die flügelartige Muster bildeten. Auch die Stiefel der Verstorbenen waren mit goldenen Zierbändern verkleidet; auf den Hosen hatte man zudem zahlreiche goldene Miniaturperlen aufgenäht. Jeweils links neben dem Kopf lag ein bronzener Spiegel, einer davon mit vergoldetem Griff, sowie ein haubenartiger Kopfputz, auf dem goldene Tierstilplatten aufgenäht waren. Während die Frau noch zwei goldene und rundherum im Tierstil verzierte Nadeln besaß, die ursprünglich wohl einen perückenartigen Kopfputz befestigt hatten, trug der Mann als Statussymbol einen fast zwei Kilogramm schweren Halsring aus massivem Gold, den umlaufende Tierstilornamente verzierten. Zu seinen Grabbeigaben gehörte ferner ein goldener Köcher mit Gold verziertem Tragegurt; selbst die eisernen Pfeilspitzen zeigten Spuren von Vergoldung. Insgesamt enthielt die Grabkammer mehr als 9300 Goldobjekte – die unzähligen goldenen Miniaturperlen nicht eingerechnet – von großteils einzigartigem künstlerischem Wert. Einen solchen Fund hatte es in Sibirien bislang nicht gegeben.

Dieses skythische Grab stammt vermutlich aus dem 5. Jahrhundert v. Chr. So reich ausgestattete skythische Fürstengräber kannte man nur aus dem Nordschwarzmeerraum, doch deren Goldarbeiten zeigen deutlich griechische Einflüsse. Hier in Aržan, im Herzen Asiens, wurden den Vornehmen lokale Erzeugnisse mit ins Grab gegeben. Die waren aber in einer technischen und künstlerischen Perfektion gearbeitet, die der griechischer oder vorderasiatischer Handwerker in nichts nachstand. Die Ausgrabungen des Kurgans Aržan 2 werden in diesem Sommer fortgesetzt.

Alles deutet also darauf hin, dass die Reiterkriegernomaden, deren Kultur wir heute als skythisch bezeichnen, in Südsibirien ihre Heimat hatten. Von dort aus haben sie sich über die westsibirische Tiefebene in den Raum nördlich des Schwarzen Meeres ausgebreitet, wie Kurgane, Siedlungen und ein Kultplatz (Bild oben) in diesem geografischen Bindeglied belegen. Hatte Herodot Recht, und eine eurasische Völkerwanderung vertrieb die Skythen aus ihrer Heimat (allerdings ohne den Umweg über Vorderasien)? Eine in Westsibirien entdeckte Niederlassung von mehr als hundert Häusern, mit einer Zitadelle und klarer Gliederung durch „Straßenzüge“ bei Èièa belegt eine fortgeschrittene Kultur im Übergang von der späten Bronzezur frühen Eisenzeit (10. bis 8. Jahrhundert v. Chr.), die den vordringenden Nomaden weichen musste. Was mag sich damals abgespielt haben? Das Rätsel um die Skythen steht erst am Anfang seiner Entschlüsselung. ■

Hermann Parzinger *leitet die Grabungen der Eurasien-Abteilung des Deutschen Archäologischen Instituts in Sibirien und Kasachstan.*



Literaturhinweise

Expedition ins unbekannte Sibirien. Von J. G. Gmelin und D. Dahlmann (Hgg.). Sigmaringen 1999.

Gold der Steppe. Archäologie der Ukraine. Von R. Rolle, M. Müller-Wille und K. Schietzel (Hgg.). Ausstellungskatalog Archäologisches Landesmuseum, Schleswig 1991.

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*

MIKROELEKTRONIK

Fertigbau mit Steigleitungen

Flache Chips haben lange Leitungen, die weiterer Miniaturisierung Grenzen setzen. Übereinander gestapelte Schaltkreise sollen die Probleme lösen.

Von Roland Wengenmayr

Bislang sind Mikrochips ebene Gebilde, doch solche Strukturen benötigen relativ lange Leiterbahnen, um die einzelnen Elemente ihrer Schaltung zu verbinden oder sich mit den anderen Halbleiterplättchen auf der gleichfalls ebenen Platine auszutauschen. Das verlängert zwangsläufig den Weg der elektrischen Signale und beschränkt so die mögliche Schaltgeschwindigkeit. Zudem mindern große Lötkontakte die Qualität der Signalübertragung.

Ohnehin setzen Standardgehäuse, die einen Chip mechanisch schützen, dem Datenaustausch auf der Leiterplatte geometrisch bedingte Grenzen. Sie erinnern an rechteckige Käfer, aus deren Flanken kleine Metallfüßchen wachsen. Über jeden solchen „Pin“ kann nur ein elektrisches Signal fließen, maximal einige hundert finden an den Gehäusen Platz (ein Pentium-4-Prozessor hat 478 Pins). Das limitiert den Informationsfluss von Chip zu Chip und damit eine Parallelisierung der Verarbeitung etwa in so genannten Beowulf-Clustern, also Hypercomputern aus vielen parallel arbeitenden PCs (SdW, 3/2002, S. 88).

„Wir leben bereits mit einer Verdrahtungskrise“, meint Peter Ramm, Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration in München (IZM). „Heute arbeiten Standard-Prozessoren mit Taktfrequenzen von zwei Gigahertz, in zehn Jahren sollen es mehr als zehn Gigahertz sein. Das wird sich mit der gängigen Verdrahtungstechnik kaum machen lassen.“

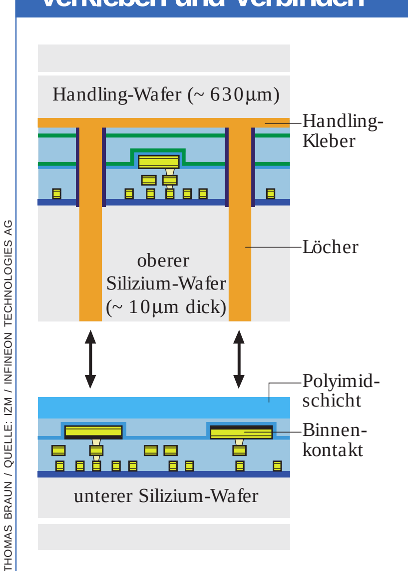
Als Lösung propagieren Entwickler eine Stapelbauweise, die Chips in Stockwerken aufeinander schichtet. Im Idealfall verkürzen senkrechte elektrische Leitungen die Signalwege erheblich, überdies wären bei heutigen Strukturgrößen von einigen Mikrometern mehrere Millionen solcher „Steigleitungen“ pro Quadratzentimeter Chipfläche möglich. Das Stapeln spart Platz und Gewicht, kürzere Verbindungen bedeuten gleichzeitig weniger Ohm’schen Widerstand und damit weniger Abwärme. Beide Aspekte sind besonders für tragbare Geräte wie Handys oder Notebooks von Bedeutung. Einige 3-D-Verfahren erlauben auch eine enge Vernetzung von Schaltungen, die aus unterschiedlichem Material bestehen oder mit verschiedenen Technologien produziert werden müssen. Diese Mischtechnologie („Systems-on-a-Chip“ oder „Mixed Technology“) ist für Chiphersteller äußerst attraktiv (SdW 1/1999, S. 93 und 7/2001, S. 92).

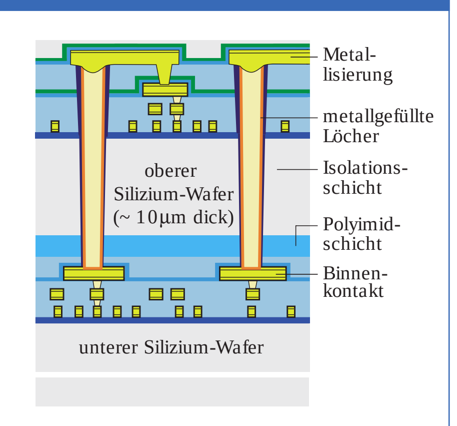
Die älteste Technik im „Chip-Hochbau“ ist die monolithische Integration. Sie spielt das chemisch-physikalische Instrumentarium der Halbleitertechnologen aus, um Struktur über Struktur zu legen: Maskieren, Belichten, Ätzen, Aufdampfen von frischem Halbleitermaterials (meist Silizium), Tempern und viele Schritte mehr. Dies erlaubt zwar so kurze Signalwege wie kaum eine andere Technik, scheitert aber bislang an einem gravierenden Nachteil. Wenn Silizium für eine neue Struktur aufgedampft wird, bildet es ein weitgehend ungeordnetes, amorphes Netzwerk; für hochwertige Halbleiterschaltungen ist aber ein perfekter Kristall vonnöten. Der entsteht durch nochmaliges Aufheizen der neuen Schicht auf mehr als tausend Grad Celsius. Doch das zerstört bereits fertige, tiefer liegende Halbleiterstrukturen. „Die monolithische Integration galt deshalb nur bis Ende der 1980er Jahre als die Zukunftsvision“, kommentiert Holger Hübner, Projektleiter bei der Infineon Technologies AG. Sie wird sich wohl nur bei sehr speziellen Produkten etablieren, für deren obere Geschosse Silizium minderer Qualität genügt.

Alternative Verfahren setzen auf Fertigbauten aus konventionell produzierten Schaltkreisen. Bei der Chip-to-Chip-Technologie werden einzelne Schaltungen gestapelt und meist mit Epoxydharz verklebt, die Wafer-to-Wafer-Methode setzt gleich komplette Wafer – also Scheiben aus Silizium-Einkristall – mit jeweils Tausenden fertiger Chips aufeinander, bevor der verklebte Stapel in 3-D-Chips zersägt wird. Von dieser parallelen Produktion vieler tausend Einheiten erwarten Experten günstige Herstellungskosten.

Mit den Stapel-Methoden kann die Industrie sehr geschickt Chips verschiedener Technologien integrieren. Das ist zum Beispiel bei Mikroprozessoren in Computern wichtig, in denen logische Schaltungen schnell auf Speicher zugreifen müssen – in der obersten Ebene könnte das Rechenwerk liegen, direkt

Verkleben und Verbinden





Das VSI-Verfahren von IZM und Infineon ist eine mögliche Variante im Chip-Plattenbau. Nach dem Einbringen von Leitungskanälen im oberen Wafer wird dieser zur besseren Handhabung an einen „Handling-Wafer“ geklebt und dann auf seinem Gegenpart justiert. Sind die beiden Wafer verklebt, wird der Handling-Wafer entfernt, die Bohrungen elektrisch isoliert und mit Metall gefüllt. (grau: Silizium-Wafer; gelb: metallische Leiterbahnen; hellblau und grün: Maskierungsmaterial; dunkelblau: Isolationsschicht; orange: Klebstoff zum Halten des Handling-Wafers; türkis: Polyimidschicht zum dauerhaften Verkleben; hellgelb: Metallfüllung)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, THOMAS BRAUN / QUELLE: IZM / INFINEON TECHNOLOGIES AG



IRVINE SENSORS CORP.

Das Chip-Hochhaus ist bereits Realität: Ein Speichermodul von Irvine Sensors besteht aus einem verklebten Stapel von bis zu vierzig konventionellen Chips. Sie werden über die Leiterbahnen an den Flanken des Stapels elektrisch verbunden.

darunter der Speicherbaustein. Heute werden solche Elemente noch nebeneinander auf einem Chip platziert. Doch das ist sehr teuer, weil das Element mit dem aufwendigsten Fertigungsprozess die Gesamtzahl der Produktionsschritte bestimmt. Getrennte, spezialisierte Chips, die per 3-D-Integration eng vernetzt werden, lösen dieses Problem elegant und billiger.

Die Verdrahtung dieser Ebenen erfolgt über so genannte Inter-Chip-Vias (ICVs). Deren Abmessungen sollten fast so fein sein wie die mikroskopischen Strukturen der Schaltkreise. Eine zentrale Forderung der Industrie: Die Herstellung der Vias wie auch die der Stapel selbst muss sich der etablierten Standardverfahren bedienen, in die erheblich investiert wurde.

Ein solches 3-D-Verfahren ist die Vertikale-System-Integration (VSI, siehe Grafik links). Das IZM hat diese Technologie im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts zusammen mit dem Unternehmen Infineon entwickelt. Ausgangsmaterial sind Wafer mit konventionell gefertigten Chips. In jeden Wafer, der hinzu kommt, werden zuvor etwa zehn Mikrometer tiefe Gruben mit zwei bis drei Mikrometer Durchmesser geätzt. Sie sitzen dort, wo jeweils ein Inter-Chip-Via entstehen soll. Auf den Wafer wird oben ein „Handling-Wafer“ aufgeklebt. Dann wird er von unten von ursprünglich etwa 700 Mikrometer auf zehn Mikrometer Dicke abgetragen (gedünnt). Nur diese dünne Schicht wurde während der Lithografie strukturiert, der Rest ist Trägermaterial. Auf diese Weise werden die geätzten Gruben zu Kanälen, die den Wafer komplett durchdringen.

Löten und Legieren

An den komplementären Stellen des unteren Wafers befinden sich Metallkontakte („Pads“ beziehungsweise „Binnenkontakte“). Diese haben einen Durchmesser von weniger als zehn Mikrometern. Beim Zusammensetzen der Wafer müssen die mikroskopischen Pads die mikroskopischen Kanäle exakt treffen. Das übernimmt ein optisches Justierverfahren, das in der Halbleiterindustrie Standard ist: Es überlagert die mikroskopischen Bilder der Kontaktflächen beider Wafer und verschiebt beide so lange, bis die ICVs des oberen und die Pads des unteren Wafers sich treffen. Da sichtbares Licht verwendet wird, beträgt die Genauigkeit weniger als ein Mikrometer.

Eine dünne Polyimidschicht auf dem unteren Stockwerk verklebt dann den Stapel. Zum Schluss werden die Inter-Chip-Via-Kanäle geöffnet, innen isoliert und dann mit einem leitenden Metall, Wolfram oder Kupfer, gefüllt. Die Pads bilden dabei das Kontakt-Fundament, auf dem die Metallfüllungen der Inte-Chip-Vias wie leitfähige Säulen stehen. Auf diese Weise lassen sich mehrere Millionen Kontakte pro Quadratzentimeter anlegen.

Infineon hat zudem ein Verfahren namens Solid entwickelt, bei dem die Chips nicht aufeinander geklebt, sondern miteinander verlötet werden. Solid verdankt seinen Namen einem speziellen Lötverfahren, der Solid-Liquid-Diffusion (zu Deutsch: Diffusionslöten). Es verwendet eine sehr dünne Zinnschicht, die sich beim Erhitzen völlig auflöst und deren Atome mit den zu verbindenden Metallteilen eine feste, hitzebeständige Legierung bilden.

Inter-Chip-Vias sind nicht vonnöten. Der obere und der untere Chip tragen vielmehr winzige Binnenkontakte von jeweils 15 Mikrometer Durchmesser, einer von beiden zudem die Schicht aus Lötzinn. Dann drehen die Technologen den oberen Chip herum – sie sprechen vom Flip-Chip – und justieren ihn optisch auf dem unteren. Zum Schluss wird das Sandwich bei schonenden 270 bis 300 Grad Celsius verlötet.

Obwohl auch Solid im Prinzip unbegrenzt viele Schaltungsebenen stapeln kann, will Infineon zunächst mit nur zweien in Produktion gehen. Holger Hübner erläutert: „Bei zwei Schichten müssen wir den oberen Wafer nicht dünnen und sparen uns deshalb den Handling-Wafer. Das reduziert den Solid-Prozess von knapp hundert auf nur zwölf Schritte und halbiert dabei die Zahl der notwendigen Chipgehäuse. Und das rechnet sich schon.“ Zumal Solid bereits Chips unterschiedlicher Herkunft und Produktionsweise kombinieren kann. Die Binnenkontakte müssen dafür nicht einmal perfekt aufeinander passen, eine dünne Umverdrahtungsschicht vermittelt die elektrischen Leitungen.

Solid erlaubt bis zu mehrere hunderttausend Binnenkontakte pro Quadratzentimeter, also aus heutiger Sicht einen enormen Zuwachs an parallelen Inter-Chip-Verbindungen. „Das ist derzeit nur für spezielle High-End-Anwendungen wichtig“, so der Projektleiter. Die winzigen Kontakte und kurzen Leitungen haben zudem geringe parasitäre Streukapazitäten. „Dadurch ist es uns erstmals möglich, sehr hochfrequente elektrische Signale bis zu hundert Gigahertz über die Grenze eines Chips hinaus zu einem zweiten zu übertragen.“ ■

Der Physiker **Roland Wengenmayr** *ist Redakteur bei „Physik in unserer Zeit“ und freier Wissenschaftsjournalist.*

GESICHTSCHIRURGIE

Verdeckte Operationen

Mit Hilfe von Infrarotmarkern und Computersimulationen verschieben Chirurgen Knochenstücke auf den Millimeter genau.

Von Rüdiger Marmulla, Stefan Hassfeld und Joachim Mühling

Wenn Karikaturisten Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens aufs Korn nehmen, überzeichnen sie gern die charakteristischen Merkmale des Gesichts, der wohl wichtigsten Schnittstelle in der Kommunikation zwischen Menschen, wie Redewendungen von „freundlichen Augen“ oder einem „verschlossenen Gesichtsausdruck“ verdeutlichen.

Patienten, deren Gesichtsschädel durch Unfall oder Krankheit oder von Geburt an deformiert ist, haben dementsprechend soziale, oft auch körperliche Probleme. Als Gesichtschirurgen versuchen wir, wo möglich, Defekte zu reparieren. Dabei mangelt es den meisten Kollegen an einer effektiven technischen Unterstützung. So diffizil es oft ist, ein durch Unfall verschobenes Stück Knochen an die ursprüngliche Stelle zu bewegen oder eine Lücke zu schließen, so altertümlich mutet das übliche Vorgehen an: Die Planung und Durchführung der Operation erfolgt meist nur nach Augenmaß und im Vertrauen auf das eigene handwerkliche Geschick. Die Darstellung der Gewebeverteilung in den Schnittbildern der Computertomografen ist dabei eine große Hilfe. Seit den 1980er Jahren lassen sich daraus auch räumliche Modelle des unter dem Mantel von Haut, Fett und anderen Weichteilen verborgenen Knochens berechnen, doch im Allgemeinen fehlt die Verbindung zur realen Situation im Operationssaal.

Anfang der 1990er Jahre gelang es erstmals, Computertomografie(CT)-Daten zur Operationsplanung zu nutzen. Eine kleine Anleihe bei den Konstrukteuren industrieller Produkte half: Diese fertigten Kunststoffmodelle ihrer am Computer ausgeführten Entwürfe mittels Stereolithografie (dabei steuert ein Computer einen Laserstrahl durch ein Kunststoffbad; das Polymer härtet an den belichteten Stellen aus). Aus den räumlichen Computermodellen des Schädels werden so reale Modelle, die der Arzt in die Hand nehmen, auseinander sägen und neu zusammenfügen kann, um seinen Eingriff vorzubereiten. Allerdings ist die Zahl dieser Probeläufe beschränkt, denn ein solches Modell kostet weit über 5000 Euro. Und noch immer fehlte ein Verfahren, die Planung am realen Patienten zu reproduzieren.

Gute Referenzen – präzise Operation

Jeffrey Fialkov vom Sunnybrook and Women’s College Health Sciences Centre in Toronto (Kanada) spannte daher im Jahr 1992 den Patienten in einen Kopfrahmen ein. Damit wurde er geröntgt, anhand des CT-Datensatzes dann der Eingriff geplant. Ein mechanischer Vorschub im Rahmen ermöglichte, das daran befestigte Knochensegment kontrolliert um die geplanten Millimeter zu versetzen. Für den Patienten war diese Methode jedoch eine Tortur, denn er musste den Rahmen bis zum Ende der Operation tragen.

Court B. Cutting und Russell H. Taylor vom Medizinischen Zentrum der Universität New York ließen sich davon inspirieren und ersetzten den Rahmen durch bis zu acht Markierungsschrauben, die im CT sichtbar sind. Sie dienten Cutting und Taylor als geometrische Bezugspunkte. Die Planung erfolgte am Computermodell, das auf dem CT-Datensatz basierte. Während der Operation wurden Instrumente und Planungsdaten mit Bezug zu den Markierungen in den Bilddatensatz des Patienten projiziert.

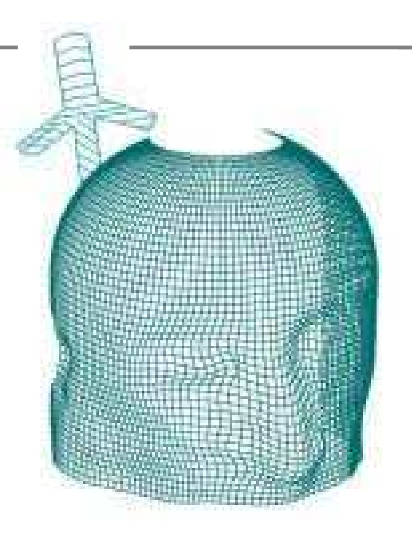
Cutting setzte sein Verfahren aber nur wenige Male ein, denn die Ungenauigkeit lag zwischen zwei und vier Millimetern, und das ist oft der Bereich, in dem Gesichtschirurgen Knochen therapeutisch versetzen. Die Fehlerquelle lag im Verfahren selbst begründet: Um die Strahlenbelastung erträglich zu halten, haben CT-Schichtaufnahmen im Mund-, Kiefer- und Gesichtsbereich einen Abstand von mindestens zwei Millimetern; eine Markierungsschraube konnte also im schlimmsten Fall genau zwischen zwei Schichten liegen und stellte sich damit im Computertomogramm nicht korrekt oder nur unzureichend dar.

Als wir vor sieben Jahren darangingen, eine durchgängige technische Unterstützung für die Gesichtschirurgie zu entwickeln, wollten wir zum einen die notwendige Präzision erreichen, zum anderen dem Patienten das Einsetzen von Markierungsschrauben in den Kopf vor einer CT-Aufnahme ersparen. Auf die im Folgenden beschriebene Weise haben wir mittlerweile achtzig Patienten erfolgreich behandelt.


RÜDIGER MARMULLA

Aus dem Datensatz der Computertomografie lässt sich der von außen sichtbare Weichteilmantel des Operationsgebiets rekonstruieren (links) und zur Planung vom darunter liegenden Knochen ablösen (Mitte). Diesem Patienten hatte ein Unfall das Jochbein verschoben, sodass der Augapfel verlagert wurde. Doppelbilder waren die Folge. Während der Operation muss der Chirurg das Abbild, das die aktuelle Position des Knochensegments (rot) beschreibt, in die Sollposition (grün) navigieren (rechts).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / THOMAS BRAUN / R. MARMULLA


Ein Laserscan stellt künftig den Zusammenhang von Computertomografie (links ein aus dem Röntgendatensatz errechnetes Gesicht) und dem fixierten Infrarot-Referenzsystem her (Mitte). Eine Art Bluescreen-Verfahren ermöglicht, Objekte wie den Beatmungsschlauch ein- beziehungsweise auszublenden (rechts).

Anstelle der acht Markierungsschrauben als Referenzpunkte fertigen wir auf der Basis eines kleinen (und damit kostengünstigeren) Stereolithografie-Modells des fehlstehenden Knochensegments eine Kunststoffschablone, die auf der Oberfläche des realen Knochenstücks wie ein Schlüssel im Schloss einrastet. Sie basiert auf durchschnittlich 2000 Oberflächenpunkten aus dem Computertomogramm und begründet die – gegenüber den nur acht Messpunkten von Cutting – höhere Genauigkeit. An dieser Schablone befestigen wir ein Infrarotsendesystem A, das uns während der Operation die aktuelle Position des zu bewegenden Knochens über eine Infrarotkamera meldet. Die Negativschablone ist dabei das Bindeglied zwischen Computer und realer Welt, denn ihre Geometrie leitet sich direkt aus dem CT-Datensatz (der virtuellen Welt) ab. Das Infrarotsendesystem kann fest mit ihr verbunden werden und lässt sich nun in den CT-Datensatz projizieren.

Um das Knochenstück während der Operation zusammen mit der Negativschablone und dem Sender A zu bewegen, benötigten wir noch ein unbewegtes Infrarotreferenzsystem B an der Schädelkalotte. Über diese Referenz vergleicht der Computer Planung mit realem Eingriff. Dazu werden schließlich noch beide Sender vor dem Durchtrennen des Knochens eingemessen. Ihre räumliche Beziehung zueinander liegt nun fest, und B lässt sich in den CT-Datensatz spiegeln.

So lässt sich ein Knochen ganz ohne Markierungsschrauben gezielt bewegen, fachlich „navigieren“. Der operative Vorgang selbst beginnt mit Einschnitten in Bereichen, die entweder von Haaren bedeckt sind oder eine ästhetisch unauffällige Narbenheilung versprechen. Von dort aus lösen wir die Weichteile vom Knochen, erzeugen sozusagen einen Tunnel unter der Haut zum fehlstehenden Knochensegment. Durch diesen Raum schieben wir die Negativschablone, bis sie in der richtigen Position einrastet; dann wird sie seitlich festgeschraubt.

Ein Laserscan ersetzt das Kunststoffmodell

Ein kleiner Schnitt über dem zu verschiebenden Knochensegment ermöglicht, das Infrarotsendesystem A am Adapter der Kunststoffschablone anzukoppeln. Es folgt die erste Messung, bei der die Position des Infrarotreferenzsystems B gegenüber dem Sendesystem A bestimmt wird. Dann sägen wir das Knochenstück aus, lösen und verschieben es.

Ein Monitor zeigt uns dazu ein Abbild des Knochens als Drahtgittermodell, das wir beim Navigieren in ein zweites überführen, das die Sollposition der Planung kennzeichnet. Dort wird das Knochensegment verschraubt, dann werden die technischen Hilfsmittel gelöst und die Schnitte vernäht. Auf diese Weise können wir auf einen Millimeter genau arbeiten, unserer Meinung nach eine ohne Roboterunterstützung kaum zu verbessernde Grenze.

Wir wollen aber den komplexen Vorgang der Referenzierung ganz dem Computer überlassen und die teure Stereolithografie vollständig umgehen. Dazu scannen wir zu Beginn der Operation den intakten Hautmantel samt Referenzsystem B mit einem Laser ein und überführen das gemessene Profil des Gesichts in das aus dem Computertomogramm berechnete. Die Schnittstelle zwischen realer und virtueller Welt ist nun dieser Laserscan, die Kunststoffschablone entfällt. Dass das Gesicht genügend formstabil ist, um einen präzisen Abgleich zwischen Patient und Computertomogramm zu gewährleisten, haben wir bereits in einer Machbarkeitsstudie gezeigt.

Da wir uns in dem neuen Laserscanverfahren nun etwa 60 000 Oberflächenpunkte aus dem Computertomogramm zu Nutze machen können, wächst die Präzision des Verfahrens weiter. In voraussichtlich drei Jahren, so unsere Hoffnung, könnte das neue Laserscansystem mit vollautomatischer Patientenregistrierung zur Standardausstattung der Gesichtschirurgie gehören. ■





Der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurg **Rüdiger Marmulla** *(links) entwickelte die Grundlagen des beschriebenen Verfahrens an der Universität Regensburg mit Unterstützung des Unternehmens Carl Zeiss. Er ist Oberarzt am Universitätsklinikum Heidelberg, ebenso wie sein Kollege* **Stefan Hassfeld** *(Mitte).* **Joachim Mühling** *ist Präsident der Deutschen Gesellschaft für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und leitet den Sonderforschungsbereich 414 „Rechner- und sensorgestützte Chirurgie“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.*

MIKROSKOPIE

Lasergewitter in der Zelle

Was in lebenden Zellen vorgeht, lässt sich meist nur indirekt durch Messungen erschließen. Ultrakurze Laserblitze sollen die molekularen Mechanismen sichtbar machen.

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Wie schützt sich eine Zelle vor Sauerstoffmangel? Wie erwirbt ein Tumor Resistenz gegen Chemotherapeutika? Manches Geheimnis wäre für Molekularbiologen wohl leichter zu entschlüsseln, wenn man die entsprechenden Vorgänge in der Zelle sichtbar machen könnte. Eine Möglichkeit solcher zellulären Mikroskopie: Die vermutlich an den fraglichen Prozessen beteiligten Signalmoleküle oder Zellstrukturen werden mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert. Beleuchtet man das Untersuchungsgebiet dann mit blauem Licht, leuchten die Farbstoffe überall dort, wo sich etwas Interessantes tut.

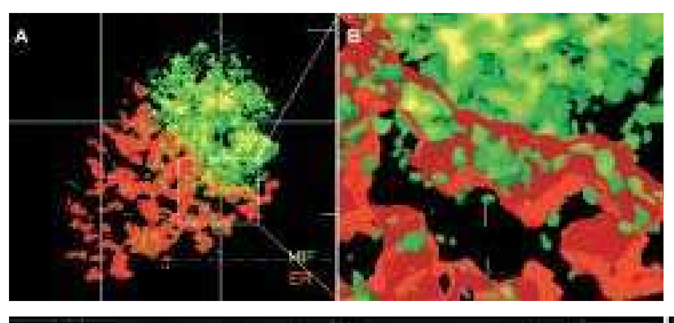
Diese gängige Technik hat allerdings erhebliche Nachteile: Das energiereiche Licht kann Sauerstoffradikale erzeugen, welche die zu untersuchenden Zellstrukturen und Moleküle angreifen; mitunter werden auch die Farbstoffmoleküle zerstört. Überdies unterscheidet das Verfahren Zellstrukturen nur in der Fläche und das zudem recht grob.

Eine Alternative entwickelte das Team von Helmut Acker am Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie in Dortmund. Die Wissenschaftler verwenden ultrakurze Pulse infraroten Laserlichts: Pro Sekunde schießt ein Titan-Saphir-Laser 76 Millionen Blitze in die Zelle. Im zeitlichen Mittel ist die eingestrahlte Energie viel zu schwach, um Schäden anzurichten, die Pulse aber sind so energiereich, dass sie zumindest im Fokus des Objektivs Fluoreszenz anregen können. Dieses leuchtende Volumen ist nur 0,1 bis 0,01 billiardstel Liter groß, sodass eine einzelne Zelle mit bis zu 100000 Punkten in allen drei Raumkoordinaten abgetastet werden kann.

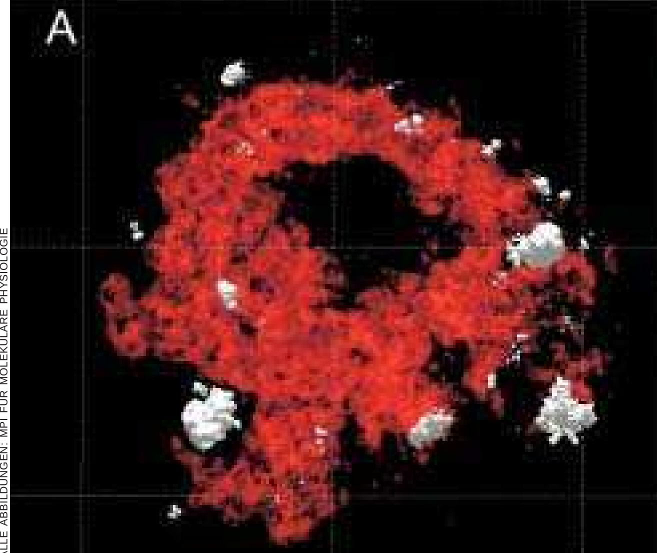
Ein Problem war allerdings, dass die Optik eines Mikroskops das Bild etwas verzerrt. Deshalb kalibrierten die Wissenschaftler ihr System anhand winziger fluoreszierender Kunststoffkügelchen mit bekannten Abmessungen. Sie vermaßen die Verzeichnung des Bildes und nutzten diese Daten anschließend, um die Abbildungen biologischer Strukturen zu korrigieren.

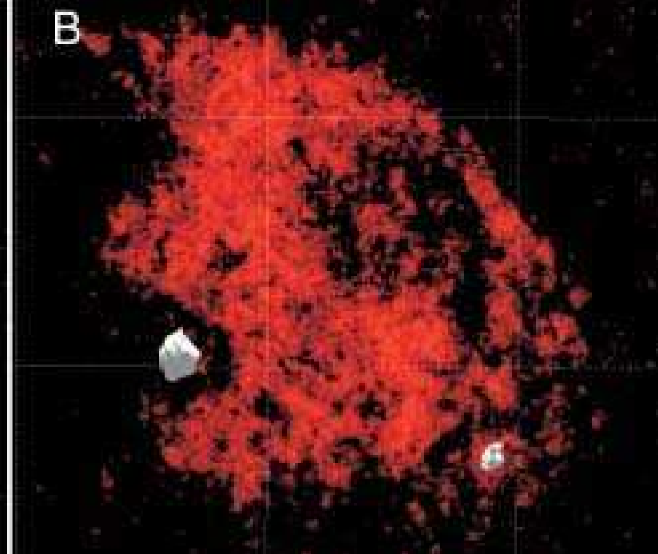
Dieses räumlich arbeitende Laserscan-Mikroskop erreicht eine Auflösung von etwa 0,2 Mikrometern (tausendstel Millimeter). Damit beobachteten die Forscher bereits eine wichtige Instanz der Eiweißsynthese in der Zelle, das endoplasmatische Reticulum. Als physiologische Reaktion auf Sauerstoffmangel produzierte es weniger Sauerstoffradikale (siehe rechtes Bild unten). Als Folge davon wurden mehr Signalmoleküle gebildet, die im Zellkern schützende Gene aktivieren. Dazu bildete das endoplasmatische Reticulum porenförmige Öffnungen um den Zellkern herum, die vermutlich den Eintritt der Signalmoleküle erleichtern. Solche Einsichten könnten helfen, gezieltere Medikamente gegen Tumoren zu entwickeln, da sich Krebszellen der gleichen Mechanismen bedienen, um sich gegen Chemotherapeutika zu wehren. ■

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Das Laserscan-Mikroskop macht bei einer Leberkrebszelle molekulare Vorgänge rund um die Eiweißsynthesefabrik und ihre Logistiksysteme (endoplasmatisches Reticulum, rot) sichtbar. Links: Bei Sauerstoffmangel werden Signalmoleküle (grün bis gelb) in Richtung Zellkern ausgeschleust. Überall dort, wo das Rot im Bild völlig fehlt, hat sich eine porenförmige Öffnung gebildet. Unten: Beim Wechsel von normaler Sauerstoffversorgung (A) zu Sauerstoffmangel (B) bilden sich außerdem weniger Sauerstoffradikale (weiß).





ALLE ABBILDUNGEN: MPI FÜR MOLEKULARE PHYSIOLOGIE

Radeln am Seil und Wandern an der Decke



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DELFT

Mit diesem Kletterfahrrad kann man Seile emporfahren.

Einfach alles wird in Holland mit dem Fahrrad gemacht, selbst ein senkrechter Parcours mit dem „Fiets" bewältigt – allerdings nur mit einem speziellen „Kabelfiets". Studenten der Technischen Universität Delft konstruieren solche Vehikel, die an hängenden Seilen hochfahren können. Alljährlich präsentieren die Studenten in einem Wettbewerb ihre Entwürfe, die entsprechend ihrer Qualität und Fahrgeschwindigkeit ausgezeichnet werden. In einem zweiten Wettkampf gehen Studenten mit selbst entworfenen Hilfsmitteln die glatten Wände hoch. Sie müssen obendrein die Decke entlangmarschieren und wieder heruntersteigen. Eine elektrische Unterstützung ist erlaubt, gibt aber Abzüge in der Wertung. Vergleichbare Geräte sind bereits patentiert und werden beispielsweise bei der Gebäudereinigung eingesetzt. *(Technische Universität Delft)*

Laserbetriebener Mikropropeller

Ganz ähnlich, wie eine steife Brise Windmühlen antreibt, kann im Mikrokosmos Licht winzige Rotoren in Bewegung setzen. Wissenschaftler von der Ungarischen Akademie der Wissenschaften konstruierten mit Hilfe von Laserlicht nur wenige Mikrometer große Propeller aus Harz, die sie mit einer so genannten optischen Pinzette manipulierten. Ein solches Werkzeug ist nichts anderes als ein durch ein Objektiv fokussierter Laserstrahl. Die rechtwinklig zur optischen Achse zeigende Komponente wurde auf den Rotor übertragen und versetzte ihn in Drehung. Die Frequenz stieg dabei proportional zur Lichtintensität an – bei zwanzig Milliwatt schaffte der Minipropeller zwei Umdrehungen pro Sekunde. Sogar die Drehrichtung ließ sich mit dieser Methode steuern, da der Lichtimpuls vor und hinter dem Fokus in entgegengesetzter Richtung verläuft: So drehte sich der Rotor gegen den Uhrzeigersinn, wenn er zwischen Objektiv und Brennpunkt lag. Befand er sich hinter dem Brennpunkt, rotierte er im Uhrzeigersinn. Die kleinen Quirle könnten in mit Licht angetriebenen Mikropumpen oder zur Analyse von großen Molekülen wie der DNA eingesetzt werden. (*Applied Physics Letters 80/ 24 (2002): 4656*)

Perfekte Orientierung im Raum

Für Satelliten ist es nicht einfach, anhand der Sternpositionen ihre Position im Raum exakt zu bestimmen. Deswegen werden sie in der Regel von der Erde aus gesteuert. Ganz anders der Proba-Satellit (*Project for On-Board Autonomy*). Er besitzt ein *Attitude Control and Navigation System* (ACNS), um eigenständig zu navigieren. Herzstück des ACNS ist ein so genannter *star tracker* (Sternenfinder), der die Stellung des Satelliten im Raum so exakt berechnet, wie es bisher nur von der Erde aus möglich war. Dazu gleicht das Gerät die Stellung der Sterne mit der Bewegung der Erde ab – die Daten dafür stammen von einer Kamera und einem GPS-Empfänger. Praktischer Nutzen der perfekten Lagebestimmung: Proba liefert extrem detaillierte Bilder von der Erde. *(Esa)*

ESA



Der *star tracker* ermöglicht Satelliten autonomes Navigieren.

Stromerzeugung mit Wasserstoff

Spektakulär sieht er nicht aus, der Stapel Brennstoffzellen – aber er hält den aktuellen Weltrekord der Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit Festelektrolyt (SOFC, *Solid Oxide Fuel Cell*). Eine Leistung von beachtlichen 9,2 Kilowatt erzielt der lediglich 30 Zentimeter hohe und 20 mal 20 Zentimeter breite Stapel aus 40 Einzelzellen im Forschungszentrum Jülich, wenn er mit Wasserstoff gefüttert wird, und immerhin 5,4 Kilowatt bei direkter Befeuerung mit Methan – und das alles bei einer mittleren Betriebstemperatur von nur 850 Grad Celsius. Damit konnte die Leistung von SOFCs für den Betrieb mit Wasserstoff verdoppelt, für Methan als Brenngas sogar auf das Fünffache der bisherigen Höchstleistung gesteigert werden. Das Methan wird dabei Energie sparend durch „interne Reformierung" in Wasserstoff und Kohlendioxid gespalten. Ein großer Vorteil ist die niedrige Betriebstemperatur: Sie ermöglicht den Einsatz billiger Werkstoffe. *(Forschungszentrum Jülich)*

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Brennstoffzelle mit Rekordleistung

Lufthansa AG

Auf leisen Flügeln

Wenn moderne Großraumflugzeuge starten – etwa eine Boeing B777 oder der neue Airbus A330-600 –, sind sie heute schon an der Grenze des Flughafengeländes kaum lauter als ein Lastwagen im Straßenverkehr (85 Dezibel). Die Geräuschbelastung des Mittelstreckenjets Airbus A319 lässt sich sogar mit der eines Personenwagens vergleichen: 75 Dezibel, gemessen am Flughafen Tegel in Berlin. Ziel der Lufthansa-Forschung ist es, den Lärmpegel weiter zu reduzieren.

Deshalb gehört die Flotte der Deutschen Lufthansa mit einem Durchschnittsalter von 7,3 Jahren nicht nur zu den jüngsten, sondern auch zu den leisesten der Welt. Seitdem die *International Civil Aviation Organization* (ICAO) 1977 ihre Lärmbestimmungen bei der Neuzulassung von Flugzeugen verschärft hat, wurden weltweit leisere Maschinen entwickelt und alte ausgemustert. International sank bei zivilen Starts und Landungen die Emission im Mittel um etwa zehn Dezibel – das entspricht einer Halbierung der vom menschlichen Ohr wahrgenommenen Lautstärke.

Freilich ist die Umgebung eines Flughafens noch kein Naherholungsgebiet. Anwohner protestieren immer wieder besonders gegen Erweiterungsvorhaben oder die Einrichtung neuer An- und Abflugrouten. Flughafenbetreiber und Luftverkehrsgesellschaften suchen deshalb nach Möglichkeiten, die Lärmemissionen weiter zu reduzieren, zumal die Zunahme des Luftverkehrs bisherige Erfolge zunichte zu machen droht: In den letzten 25 Jahren hat sich die Transportleistung – gemessen in Passagierkilometern – verfünffacht, das Frachtaufkommen sogar verachtfacht. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) prognostiziert beispielsweise eine weitere Verdopplung des zivilen Luftverkehrs in den kommenden zehn bis fünfzehn Jahren – allerdings ohne dabei Engpässe in der Infrastruktur zu berücksichtigen.

Das Unternehmen im Profil

Die Lufthansa AG beschäftigt weltweit mehr als 70000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Der Dienstleistungskonzern unterstützt und betreibt eigene Forschungen etwa zu Umweltauswirkungen des Fliegens. Im Team von Frank Walle, Leiter Umweltkonzept Konzern, befassen sich zurzeit vier Wissenschaftler mit klimarelevanten Spurengasen in Reiseflughöhe, Emissionsmessungen an Triebwerken und der Verringerung des Fluglärms. Die Lufthansa koordiniert und leitet im Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ das Teilprogramm „Fluglärm“. Hierfür wendet sie jährlich rund zwei Millionen Euro auf.

Weitere Informationen unter *http://cms.lufthansa.com/de/dlh/de/focus/0,1774,0-0-117187,00.html*

Deshalb beteiligt sich die Deutsche Lufthansa AG am Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ und leitet dessen Teilprogramm „Fluglärm“. Zu den hier untersuchten Maßnahmen gehören optimierte An- und Abflugverfahren (SdW 1/1999, S. 91), die Entwicklung leiserer Triebwerke sowie die Suche nach den durch die Aerodynamik gegebenen

Lediglich 75 Dezibel Schallintensität (gelbe Linie) verursacht ein startender Airbus A319 im Umfeld des Flughafens Berlin-Tegel, das ist kaum lauter als ein PKW. Die 85-Dezibel-Linie (rot) verläuft im Flughafengelände.



LUFTHANSA

STICHWORT: Dezibel

Der lauteste, schmerzfrei zu hörende Ton hat eine zehnbillionenmal höhere Schallintensität (Schalldruck) als der gerade noch vernehmbare. Eine Verzehnfachung der Schallintensität wird etwa als Verdoppelung der Lautstärke empfunden. Aufgrund dieser großen Spreizung wurde für akustische Messungen ein logarithmischer Maßstab mit der Einheit Dezibel (dB) gewählt. Per Definition ist der Hörschwelle der Wert 0 dB zugeordnet, der zehnfach stärkeren Schallintensität der Wert 10 dB. Die Schmerzgrenze liegt bei etwa 130 dB. Zum Vergleich: Eine normale Unterhaltung wird mit rund 60 dB gemessen, ein Rockkonzert oder ein Düsentriebwerk kann die Schmerzgrenze erreichen.

Schallquellen derzeit betriebener Linienmaschinen. So ließ sich die Lärmemission eines A340-Fahrwerks nach Messungen im Windkanal durch Verkleidungen um bis zu drei Dezibel mindern.

Dazu kommen Messungen auf dem Flugfeld. Mit 111 Mikrofonen wurden insgesamt 170 Flugzeuge während des Landeanflugs auf Frankfurt am Main erfasst. Eine akustische Richtantenne half, Schallquellen auf vierzig Zentimeter genau zu orten. Nach der Verarbeitung der Messdaten im Computer konnten die Wissenschaftler und Ingenieure Emissionen einzelner Bauteile wie Landeklappen, Vorflügel, Winglets oder Triebwerke identifizieren und quantifizieren, ebenso deren spezifischen Beitrag zum gesamten vom Flugzeug erzeugten Lärmpegel.

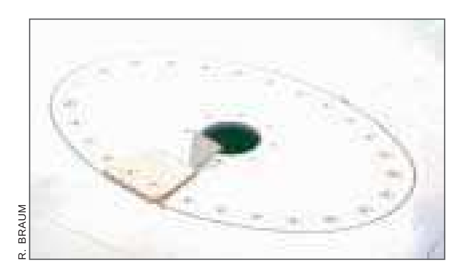
So wurde zum Beispiel am Airbus A320 ein kleines kreisrundes Loch an der Unterseite eines Flügels als Störenfried ausgemacht. Es produziert hohe Pfeiftöne, lässt sich aber nicht einfach verschließen, denn über diese Öffnung erfolgt der Druckausgleich zum Treibstofftank, der im Flügel untergebracht ist. Wissenschaftler des DLR entwickelten kleine Bleche, die, über dem Loch angebracht, Wirbel erzeugen. Dadurch werden die pfeifenden Schwingungen nicht mehr angeregt. Bei Messungen im Deutsch-Niederländischen Windkanal (DNW) erkannten die Lufthansa-Forscher zudem Hohlbolzen in den Gelenken der Fahrwerke als besonders laut – mit Kunststoff ausgegossen sind sie fast nicht mehr zu hören.

Die Lufthansa, eigentlich kein Hersteller, unterhält einen Technikbereich, der als Entwicklungsbetrieb zertifiziert ist. Ergebnisse der Lärmforschung können also bei derzeitigen Flugzeugen schon umgesetzt werden. Das nächste Ziel ist bereits ausgemacht: Auch die Großraumflugzeuge der Frachtflotte sollen leiser werden.

Dieter Beste

Der Autor ist Korrespondent von Spektrum der Wissenschaft in Düsseldorf.

R. BRAUM



LUFTHANSA



Ein Loch im Flügel (oben) sorgt für Druckausgleich, erzeugt aber laute Pfeifgeräusche. Kleine Bleche, die die Luft verwirbeln, schaffen Abhilfe. Ein Fahrwerk im Windkanal (unten): Bislang wurden Hohlbolzen bei dieser Komponente verwendet, sie wirken aber wie Orgelpfeifen und werden jetzt mit Kunststoff verschlossen.

BUNDESTAGSWAHL TEIL I:

Forschungspolitik vor der Wahl



Am 22. September wählt Deutschland einen neuen Bundestag. In einer zweiteiligen Serie kommentiert Spektrum der Wissenschaft die bisherige Forschungsförderung und stellt die unterschiedlichen Konzepte der Parteien vor. Den Anfang machen die Lebenswissenschaften in diesem Heft.

FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Wer schafft den „Ruck“?

Wo liegen die bisherigen Stärken und Defizite der Forschungsförderung in Deutschland? Wie sehen die Schwerpunkte der einzelnen Parteien aus?

Von Claus M. Schmidt

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts steht die deutsche Forschungspolitik vor einer historischen Herausforderung. Die Führungsrolle im internationalen Wettbewerb hat Deutschland eingebüßt. Die entscheidenden Schritte in den Lebenswissenschaften, der Physik und der Informationstechnologie legen andere Staaten vor wie die USA, Japan, Finnland, Schweden und die Schweiz. Nachwuchswissenschaftler und Entwickler – ohnehin Mangelware – finden im Ausland bessere Chancen. Und doch hat der Forschungsstandort Deutschland in den letzten Jahren in wichtigen Positionen an Attraktivität und Effizienz zugelegt.

Es ist wie bei Alice im Wunderland: Wer auf der Stelle steht oder langsam geht, der fällt zurück. Im weltweiten Wettbewerb brauchen wir ständig neue Erkenntnisse, Produkte, Verfahren, Methoden und Systeme, um vorwärts zu kommen. Die zu konzipieren ist die klassische Aufgabe von Forschern und Entwicklern – also von Akademikern.

Doch woher nehmen? Lediglich 28 Prozent der deutschen Schulabgänger studieren. Im internationalen Rahmen liegt die Akademisierungsquote bei 45 Prozent. Der Anteil an jungen Naturwissenschaftlern in Deutschland ist nur halb so hoch wie in England oder Frankreich. Und viele der Besten arbeiten im Ausland. Dieser Exodus an Forschern veranlasste den Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft zu einer Umfrage: 43 Prozent der deutschen Wissenschaftler, die im Ausland arbeiten, denken nicht an eine Rückkehr; 44 Prozent sind unentschlossen, ob sie weiter im Ausland bleiben oder wieder nach Deutschland zurückkommen.

Im Klartext: Die Hälfte der Befragten hat im Ausland bessere Erfahrungen gemacht als im Heimatland, die andere Hälfte will bleiben, wo sie ist, bis sich Entscheidendes ändert wie etwa Karrierechancen, Arbeitsbedingungen oder die familiäre Situation. Vor allem den Ausbildungsmöglichkeiten für die Kinder wird ein hoher Stellenwert zugewiesen. Das schlechte Zeugnis der Pisa-Studie ist da für potenzielle Rückkehrer mit schulpflichtigen Kindern wenig einladend. Da hoch qualifizierte Menschen auch Wert auf die Ausbildung ihrer Kinder legen, sind hier Bildung und Forschung am Standort Deutschland untrennbar miteinander verbunden. Und die Qualität der Schulen verheißt für unsere Zukunft im globalen Wettbewerb nicht gerade vielversprechende Entwicklungen.

Es fehlt ein „Ruck“, der nun quer durch die Parteienlandschaft angemahnt wird. Es braucht Nachwuchs an grauen Zellen, die in der Lage sind, Deutschlands wichtigstes Exportgut zu entwickeln: intelligente Produkte.

Dabei wird fleißig gearbeitet in Forschung und Entwicklung. Und das ist dokumentiert: 708 Gramm schwer, 638 Seiten stark ist der Faktenbericht Forschung 2002 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Vermutlich wäre dieser Wälzer noch umfangreicher, wäre da nicht der ausgiebige Gebrauch von Abkürzungen, die eigens in einem Anhang erläutert werden. Vom geläufigen Aids über das vielerorts erklärungsbedürftige CCOL (*Coordination Committee on the Ozone Layer*) finden sich dort über GOAP (Greifswalder Bodden und Oderästuar Austauschprozesse) bis zu ZUMA (Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen in Mannheim) Erläuterungen zu rund 500 Kürzeln. Eine Momentaufnahme deutscher Forschung.

Nun sagt die opulente Zahl und Vielfalt allein noch wenig über die Qualität aus. Fast grenzt es an Vermessenheit, angesichts dieses reichen Spektrums an Betätigungsmöglichkeiten für geschulte Geister anzunehmen, das Forschungssystem Deutschlands, das in vielfacher Hinsicht schon längst auch globalisiert ist, wäre in irgendeiner Form leichter zu regieren und zu handhaben als irgendein Land oder eine Staatengemeinschaft.

Kann ein solch komplexes System gesteuert werden, und sind Erfolge und Innovationen überhaupt durch übergeordnete Instanzen planbar? Der soeben ausgeschiedene Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, Hubert Markl, weist in einem kritischen Beitrag über zu viel Bürokratie und Regulierungswut in Deutschland darauf hin, dass die USA, die in fast allen wichtigen Forschungsdisziplinen führend sind, ohne eigenes Wissenschaftsministerium auskommen. Stattdessen lässt sich ihre Regierung von Spitzenwissenschaftlern permanent beraten.

Die gegenwärtige rot-grüne Regierung Deutschlands hat in der Forschung kräftig zugelegt. Gleichwohl ist sie vom Wahlversprechen aus dem Jahr 1998, den Etat für Forschung und Bildung in

der jetzt zu Ende gehenden Legislaturperiode um fünfzig Prozent zu erhöhen, weit entfernt geblieben. Immerhin: Sie kehrte den seit 1990 fortgesetzten Abwärtstrend in den Ausgaben für Forschung und Entwicklung um. Seit Herbst 1998 ist eine kontinuierliche Steigerung der Aufwendungen von 2,2 Prozent auf 2,4 Prozent vom Bruttoinlandsprodukt zu verzeichnen. Das sind Schritte in die richtige Richtung – doch der Weg bis zu den großen Mitbewerbern auf den Zukunftsmärkten, den USA (2,7 Prozent) und Japan (über 3 Prozent), ist noch weit. Schweden und Finnland geben 3,7 beziehungsweise 3,1 Prozent ihres Bruttoinlandsproduktes für Forschung und Entwicklung aus. Und sie haben Erfolg damit.

Fraglich ist allerdings, ob das Ziel der Wettbewerbsfähigkeit allein über finanzielle Mittel zu erreichen ist. Denn fest steht: Die Qualität der Innovationen ist allenfalls locker mit dem Volumen der Förderung durch die öffentliche Hand verbunden. Haben die großen Forscher und Entwickler Deutschlands, auf die wir uns so gern berufen, jemals ansehnliche finanzielle Unterstützung genossen? Johannes Gutenberg hat seine Druckerpresse mit geborgtem Geld entwickelt, Alexander von Humboldt seine Forschungsreisen aus eigenen Mitteln finanziert und Nikolaus August Otto den Viertaktmotor als Tüftler und in Diensten von Unternehmen zusammengebaut.

Der Wissenschaftshistoriker Klaus Fischer von der Universität Trier bringt es auf den Punkt: „Keine der Basisinnovationen, die die Geschichte der Wissenschaften, der Technik und der Kultur bestimmt haben, wurde je auf der Grundlage eines genauen Planes, eines begutachteten Forschungsprojektes oder einer staatlichen Forschungsinitiative geschaffen. Die großen Durchbrüche der Wissenschaft – die „Revolutionen“ in Astronomie, Physik, Chemie, Biologie und Medizin – sind ausnahmslos von weit blickenden Einzelpersonen erzielt worden, fern von den Geldtöpfen der Wissenschaftsförderer ...“ (Aus: Die verborgenen Quellen des Neuen, Kreativität und Planung im wissenschaftlich-technischen Fortschritt, Trier 2001)

Biotechnologie als Jobmaschine und Wachstumsmotor

Immerhin: Die Steigerung der Forschungsmittel um über 19 Prozent während der Amtsdauer der jetzigen Regierung und die geplante Fortschreibung der Zuwächse – wenn auch für das Jahr 2002 in der Größenordnung von 9 auf 9,1 Milliarden Euro im kleineren Rahmen – ist angesichts leerer Kassen ein deutliches Bekenntnis der gegenwärtigen Regierungskoalition zur Rolle der Forschung in Deutschland. Im Sog dieser Investitionen ist der Anteil privater Ausgaben für die Forschung um 21 Prozent gestiegen.


DPA

Christiane Nüsslein-Volhard, Medizin-Nobelpreisträgerin von 1995, führte ihre entscheidenden Untersuchungen nicht an einer deutschen Universität, sondern am Europäischen Molekularbiologischen Labor in Heidelberg durch.

Überdurchschnittlich profitierten von den Steigerungen der Legislaturperiode:

Biotechnologie	+ 27,6 %
Informationstechnologie	+ 19,8 %
Mobilität und Verkehr	+ 18,2 %
Strukturelle/innovative und Querschnittsaktivitäten	+ 16,9 %
Meeres- und Polarforschung, Meerestechnik	+ 14,2 %
Ernährung	+ 13,8 %
Raumforschung, Städtebau, Bauforschung	+ 12,3 %

Die Forschungspolitik hat in unserer modernen Mediendemokratie den Nachteil, dass sie von der Öffentlichkeit weniger beachtet wird als andere Politikfelder. Es fehlen solch große Aufreger wie Terrorismus, Arbeitslosigkeit, BSE oder Nitrofen, aus denen Ministerien Relevanz und Präsenz beziehen. Die Pisa-Studie machte den Handlungsbedarf in der Bildung deutlich. Ausbleibende Erfolge in der Forschungspolitik sind hingegen eher leise. Sie werden von der Öffentlichkeit und den Medien jedenfalls weniger wichtig genommen als Niederlagen der Fußballnationalmannschaft.

Für die Erfolge der Forschung gibt es eine griffige neue Formel der Politik: Erfolg der Forschung *EF* ist die Summe aus der Anzahl der Arbeitsplätze *A*, der Anzahl der Betriebe *B* und dem Umsatz *U*. Und das Ganze im internationalen Vergleich, immer orientiert am Marktführer. Es ist ein neues, unverbrämtes Bild der Wissenschaft. Forschung im Elfenbeinturm, als Selbstzweck, als Ornament der Herrschenden – passé. Eine Verschlichtung, an der große Medien und politische Parteien kräftig feilen.

Als führend im Potenzial als Jobmaschine und Wachstumsmotor wurde über die vergangenen drei Jahre die Biotechnologie von allen politischen Parteien gesehen. Eine Euphorie zeichnete sich ab, die beinahe schon vergleichbar dem Internet-Hype war. Nur Spielverderber, Ignoranten und Miesepeter mochten da abseits stehen. Doch Investoren, die den Crash zahlreicher Internetfirmen noch frisch vor Augen haben, sind heute eher zögerlich. Während sie die Biotechnologien im ersten Quartal des Vorjahrs noch mit Investitionen in Höhe von 180 Millionen Euro bedachten, waren es im ersten Quartal 2002 nur 16 Millionen Euro. Die Entwicklungszeiten und der *return on investments* erfordern deutlich längeren Atem als die Resultate der Dotcoms. Zudem findet der Investor auf diesem neuen Markt der Biotechnologien keine Referenzen und Erfahrungswerte, auf die er sich beziehen kann, die ihm helfen,

das Risiko abzuschätzen. Und wird sein Favorit als Erster ins Ziel kommen oder bringt ein Mitbewerber aus den USA, Taiwan oder Indien ein konkurrierendes Produkt schneller auf den Markt?

Das Kapital ist ein scheues Reh. Hier kann die öffentliche Hand also offensichtlich durch Forschungsförderung einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit leisten. Im wohl verstandenen Eigeninteresse – denn qualifizierte Wissenschaftler werden weltweit gesucht. Sie werden dahin ziehen, wo sie arbeiten können, und wir alle verlieren dies Kapital für die Zukunft.

Eine Zukunft, die noch in der neuesten BMBF-Publikation „im Detail“ rosig geschildert wird: „Deutschland hat seine führende Position in der Biotechnologie weiter ausgebaut. Von derzeit rund 1500 kleinen und mittleren Biotech-Unternehmen in Europa sind über 330 in Deutschland ansässig. Das bedeutet Platz 1 vor Großbritannien mit 280 Unternehmen. Wir nehmen auch den Spitzenplatz in Europa bei der Zahl der Unternehmensneugründungen ein. Der Gesamtumsatz der deutschen Unternehmen hat sich im Jahr 2000 mit 719 Millionen Euro im Vergleich zum Vorjahr mehr als verdoppelt. Die Zahl der Beschäftigten stieg im gleichen Zeitraum um über dreißig Prozent auf mehr als 10 000.“ In sieben bis zehn Jahren, so schätzt das BMBF, werde die Zahl über 50 000 liegen.

„You talked the talk, now walk the walk“, so ein englisches Sprichwort, das nach Worten Taten anmahnt. Doch der Weg nach Toronto und ein deutliches Flaggezeigen in Schwarzrotgold wurde auf der weltgrößten Biotechnologiemesse, der Bio 2002, diesen Juni in Kanada vermisst. Kein Bundesminister aus Forschung oder Wirtschaft ließ sich dort sehen, wo er doch seine Amtskollegen aus



BMBF

Der Faktenbericht Forschung 2002 des BMBF gibt eine Momentaufnahme deutscher Wissenschaft.

vielen anderen einschlägig engagierten Ländern hätte treffen können. „… walk the walk?“ Für die über 15 000 Teilnehmer der Veranstaltung gab es auch keinen deutschen Stand als Anlaufstelle. Aber gerade hier wäre Präsenz wichtig gewesen, und gerade jetzt, wo sich nach all der positiven Aufbruchstimmung erste hässliche Realitäten zeigen. Die gefeierte Boombranche erlebt ihre ersten Pleiten. Im bayerischen „Silicon Valley“ der Biotechnologie, dem Münchner Vorort Martinsried, stehen erstmals Flächen leer. Zwei Firmen sind diesen Sommer hier bereits in Konkurs gegangen.

Kenner der Branche erwarten eine „knallharte Selektion“, so Ernst-Dieter Jarasch von der BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck. Vermutlich nur vierzig bis fünfzig der gegenwärtigen Unternehmen würden die nächsten Jahre überleben.



„Und die Einsicht wächst“, kommentiert die Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung (16.06.2002), „dass der staatliche Geldsegen auch manche unprofitable oder unrealistische Idee mit einem Firmenschild versehen hat.“

Die Positionen der Parteien

Ungebremst von Realitäten sind allerdings noch die Perspektiven. Die Parteien erhoffen sich von den biotechnologischen Innovationen einen gewaltigen Effekt auf Konjunktur und Arbeitsmarkt. Denn es wird erwartet, dass unter den dreißig wichtigsten Innovationen bis zum Jahr 2020 die Hälfte mittels biotechnologischer Methoden entwickelt werden. Verständlich, dass keine der politischen Parteien, die jetzt um die Gunst der Wähler kämpfen, hier das Mauerblümchen spielen will. Dabei sein wollen alle – zumindest als Bedenkenträger.

Die SPD will die Förderung der bisher gesetzten Schwerpunkte fortsetzen. Im Faktenbericht heißt es hierzu: „Die Entwicklung der Ausgaben des Bundes für Forschung und Entwicklung und dabei insbesondere die des BMBF sind ein zentrales Kennzeichen für künftige Schwerpunkte, in denen wissenschaftlicher Fortschritt mit Hilfe staatlicher Finanzmittel gefördert werden sollen.“

Bündnis 90/Die Grünen stellen in ihrem Grundsatzprogramm Bedenken und Problembewusstsein in den Vordergrund. Aber: „Das Potenzial der Bio- und Gentechnik, Therapien für bislang unheilbare Krankheiten zu finden, wollen wir nutzen. Allerdings findet auch diese Technologie ihre Grenzen in der Unantastbarkeit der Würde des Menschen. Verbrauchende Embryonenforschung, das Klonen von Menschen oder verpflichtende Gentests lehnen wir ab.“ So beschlossen auf der Bundesdelegiertenkonferenz in Wiesbaden letzten Mai. Wobei man mit dem wuchtigen letzten Satz gleich drei offene Türen einrennt.

Bei CDU/CSU klingt gelegentlich eine biotechnologische Aufbruchstimmung an. Kanzlerkandidat Edmund Stoiber ist ja schon seit Jahren aktiver Förderer der Biotechnologien in Bayern. So dürfte das im Antrag der CDU/CSU-Fraktion dokumentierte Bekenntnis Programm werden: „Die Biowissenschaften bieten die Chance, zur Lösung zahlreicher globaler Probleme im Zusammenhang mit Gesundheit, Alter, Ernährung und Umwelt sowie nachhaltiger Entwicklung beizutragen. Die Bio- und Gentechnologie ist eine Leittechnologie der nächsten Jahrzehnte.“ Allerdings verlangt das „C“ im Parteinamen eine Differenzierung. Die CDU-Wertekommission ▶



tritt für eine restriktive Haltung bei der heiklen Frage der Reproduktionsmedizin ein. So lehnt sie eine Präimplantationsdiagnostik ab, ist für ein Verbot der Herstellung menschlicher Stammzellen und des therapeutischen Klonens.

Klar positiv äußert sich die FDP: „Die moderne Biotechnologie ist eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Als Querschnittstechnologie für sehr unterschiedliche Einsatzfelder … hat sie entscheidenden Anteil an der weiteren Entwicklung des Wissenschafts-, Technologie- und Wirtschaftsstandortes Deutschland. Die FDP will die Chancen, die sich aus der Genomforschung und der Anwendung gentechnischer Verfahren in der Humanmedizin (Rote Gentechnik), der Landwirtschaft (Grüne Gentechnik) und der industriellen Produktion (Graue Gentechnik) ergeben, aktiv nutzen.“ (aus: Liberale Argumente, Thesen zur Biotechnologie 4/01).

Von der PDS ist überwiegend Skepsis zu hören: „Rot-Grün steckt den Löwenanteil der Forschungsförderung in Prestigeprojekte wie den Transrapid und die Internationale Raumstation, in Satellitenprogramme, in die Kernfusion und die Militärforschung. Stärker als bisher werden die umstrittenen Gentechnologien gefördert, obwohl ihre ökologischen und sozialen Auswirkungen für Menschen, Tiere und Pflanzen nicht absehbar sind...“ (aus: PDS-Politik von A–Z, der Internetseite www.pds-im-bundestag.de).

Starker Skeptizismus gegen Innovationen scheint sich zu einem weltweit beachteten Merkmal Europas entwickelt zu haben. Der englische Premierminister Tony Blair prangerte dies kürzlich als „Kultur der Unvernunft“ an:

„In Bangalore traf ich Wissenschaftler, die in der Biotechnologie forschten. Sie sagten mir: ‚Europa verliert den Anschluss – ihr könnt bald zusehen, wie wir an euch vorbeiziehen.‘ Erstaunt waren sie über die Gentechnik-Debatte hier und im übrigen Europa und meinten, wir seien komplett im Griff von Protestbewegungen und Pressure Groups, die mit Emotionen die Vernunft besiegen. Und sie glauben nicht, dass wir die politische Kraft haben, uns vehement für die wissenschaftliche Seite einzusetzen. Wenn wir kein besseres Verständnis der Wissenschaft und ihrer Rolle entwickeln, so fürchte ich, werden sie Recht behalten.“

So klar hat sich bisher noch kein deutscher Regierungschef zur Forschung bekannt. ■

Claus M. Schmidt *ist als Wissenschaftsjournalist Mitinhaber des Medienbüros* Correspondence *in München.*

FORSCHUNGSPRIORITÄTEN

Wissenschaft für das Leben

Die grundlegende Bedeutung wissenschaftlicher Forschung für das Wohlergehen der Bürger ist zwar bekannt. Doch spiegelt sich diese Einsicht auch in der Forschungsförderung wider?

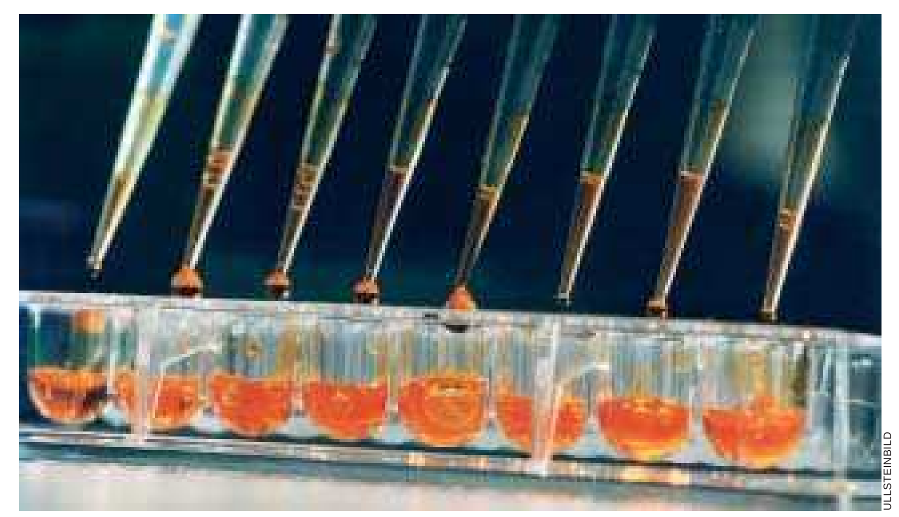
Von Hans Lehrach

Zugegeben: Die komplexen Zusammenhänge, mit denen sich die einzelnen Forschungsdisziplinen befassen, können Außenstehende ohne Vorkenntnisse in den meisten Fällen nicht verstehen. Dadurch entsteht oftmals der Eindruck, Wissenschaft werde nur im *inner circle* betrieben und diene ausschließlich dem Selbstzweck. Doch entgegen diesem Anschein haben Wissenschaft und Forschung wichtige gesellschaftliche Aufgaben.

An einem weiteren Aspekt, der in der Diskussion um die Bedeutung von Forschung häufig zu Problemen führt, sind die Wissenschaftler selbst schuld. Für manche von ihnen scheint es zum guten Ton zu gehören, die Zweckfreiheit der Forschung – sprich: einen nicht erkennbaren Nutzen für die Gesellschaft – hervorzuheben und jeglicher Art von Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse skeptisch bis feindselig gegenüberzustehen. In anderen Bereichen der Gesellschaft, die ebenfalls durch Steuergelder finanziert werden, ist eine solch vornehme Zurückhaltung hingegen nicht zu verspüren. Oft muss eine angebliche Wichtigkeit für die Gesellschaft herhalten, um ansonsten kaum zu rechtfertigende Geldausgaben zu begründen.

So werden etwa mit dem Argument, Arbeitsplätze zu schaffen und die Menschen vor äußeren Gefahren zu schützen, Ausgaben in schier wahnwitziger Höhe durchgesetzt (beispielsweise 17 Milliarden Euro für den Eurofighter). Viele Bereiche der Wissenschaft hingegen, die diese Aufgaben wirkungsvoller oder zumindest weit kosteneffizienter erfüllen, werden als Privatvergnügen abgetan.

Die Wissenschaft muss – ebenso wie andere vom Geld des Steuerzahlers finanzierte Bereiche – ihre Kosten durch den erwarteten Nutzen rechtfertigen. Da dieser aber nur in den seltensten Fällen von Anfang an zu erkennen ist, müssen wir oft den wahrscheinlichen Nutzen abschätzen, indem wir den Wert des erwarteten Gewinns mit der Wahrscheinlichkeit des Erfolges multiplizieren. Mit diesem Ansatz kann sich in gewissen Bereichen durchaus ergeben, dass der Nutzen der Grundlagenforschung denjenigen der anwendungsorientierten Forschung übersteigt. Denn die geringere Wahrscheinlichkeit eines Durchbruchs wird durch die potenziell enormen Auswirkungen eines solchen Durchbruchs kompensiert. So hat zum Beispiel die grundlagenorientierte Festkörperphysik durch die Schaffung der Computerindustrie unser Dasein revolutioniert und enorme Werte geschaffen.



ULLSTEINBILD

Zukunftsbranche Genomforschung: Aus Blutproben, die hier mit Pipetten entnommen werden, lässt sich die Erbinformation isolieren.



DPA

Frankfurter Studenten fordern während einer Demonstration 1997, Rüstungsausgaben einzusparen und für Forschung und Lehre einzusetzen.

Was können, was müssen wir Wissenschaftler tun? Wir müssen einerseits viel stärker die tragende Rolle hervorheben, die Investitionen in die Wissenschaft für die Gesellschaft spielen können, und auch bereit sein, die Kosten-Nutzen-Relation wissenschaftlicher Förderung derjenigen anderer staatlich finanzierter Bereiche gegenüberzustellen und uns daran messen zu lassen. Andererseits ist es auch innerhalb der Wissenschaft wichtig, das Vertrauen, das die Steuerzahler in unsere Arbeit setzen, zu rechtfertigen und uns diesem Gegenwert verpflichtet zu fühlen. Wir sind keine Priesterkaste, die ein gottgegebenes Recht auf Steuergelder hat. Wir müssen bereit sein, jederzeit unsere Finanzierung zu rechtfertigen. Wir dürfen nicht aus falsch verstandener Solidarität – nach dem Motto: „Eine Krähe hackt der anderen kein Auge aus" – die Mittel, die wir für bestimmte Aufgaben erhalten, auf Grund von vermeintlicher *political correctness* anderweitig einsetzen. Es stellt sich die Frage, ob die derzeitige Gleichstellung bei der Forschungsförderung, beispielsweise mit Bereichen aus den Ingenieurswissenschaften oder der medizinischen Forschung, nicht eher an der ökonomischen Realität vorbeigeht.

Die Forschungsförderung des Bundes im Bereich der Geistes-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften beträgt im laufenden Jahr 439 Millionen Euro. Für die Förderung der Biotechnologie werden 328 Millionen Euro zur Verfügung gestellt. Es ist zu vermuten, dass sich in Deutschland in der Biotechnologie eine ähnliche Entwicklung wie in den USA vollziehen wird. Das bedeutet, dass in den nächsten sieben Jahren in diesem Bereich ein Beschäftigungszuwachs auf das Fünffache zu erwarten ist. Im gleichen Zeitraum wird die Anzahl der indirekt abhängigen Arbeitsplätze durch eine verstärkte Diffusion der Biotechnologie in andere Branchen von heute etwa 220 000 auf über 500 000 anwachsen.

Folgt die Forschungsförderung den richtigen Prioritäten?

Wir können deshalb erwarten, dass die Investitionen in die Biotechnologie durch die Schaffung von Arbeitsplätzen und auf längere Sicht gesehen durch die Erwirtschaftung von Gewinnen die Steuereinnahmen erhöhen. Im Sinne des Steuerzahlers ist es sicherlich legitim zu fragen, ob die Verteilung von Forschungsmitteln nicht besser an die wirtschaftliche Relevanz, die im Bereich der Biotechnologie erwiesenermaßen vorliegt, zu koppeln wäre.

Meines Erachtens sind es vor allem vier große Bereiche, mit denen die Wissenschaft ihre staatliche Finanzierung rechtfertigen kann:

➤ Wissenschaft als kulturelle Aktivität,
➤ ihre Bedeutung für die universitäre Ausbildung,
➤ der Schutz der Menschen vor äußeren Gefahren wie Krankheiten und Hungersnöten, und
➤ die wirtschaftliche Bedeutung (Arbeitsplatzschaffung, Erhöhung der Wirtschaftskraft und damit der Steuereinnahmen).

Kulturelle Aktivitäten haben seit langer Zeit Anspruch auf staatliche Finanzierung. So liegt zum Beispiel das Budget der Berliner Opern weit über dem Betrag, den Deutschland insgesamt für Genomforschung und damit für die Erkenntnis unserer eigenen biologischen Grundlagen ausgibt. Es müsste aber viel stärker ins öffentliche Bewusstsein dringen, dass nicht nur Schopenhauer, Beethoven und Bach unsere Kultur geprägt haben, sondern auch Johannes Kepler, Robert Koch und Sigmund Freud.

Die Ausbildung ist untrennbar mit der Forschung verbunden. Denn ohne selbst an der Schaffung neuen Wissens beteiligt zu sein, ist ein Hinterfragen und kritisches Beurteilen von Lehrbuchwissen schwierig. Nur, wer selbst dauernd gezwungen ist, auf Grund neuer Daten Meinungen zu revidieren, versteht wirklich, dass alles Wissen immer nur Arbeitshypothese sein kann, die sich für einen bestimmten Zeitraum als nützlich erwiesen hat und gegebenenfalls durch ein neues experimentelles Resultat widerlegt werden kann.

Viele Bereiche der Wissenschaft tragen auch massiv zu unserem Schutz und zu unserer Wirtschaftskraft bei. Die Funktion des Schutzes liegt vor allem in der Prävention von Krankheiten. Die Ausgaben des Bundes für Forschung und Entwicklung im „Dienste der Gesundheit" werden im laufenden Jahr 667 Millionen Euro betragen. Im gleichen Zeit- ▶



raum betragen jedoch die Ausgaben für die „Wehrforschung und -technik“ fast 1,14 Milliarden Euro, also nahezu das Doppelte. Wohlgemerkt: Bei dieser Zahl handelt es nicht etwa um den Wehretat, sondern um den Anteil der Wehrforschung im Bereich Forschung und Entwicklung aus dem Haushalt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

Zurzeit stirbt ungefähr jeder Dritte an einer Erkrankung des Herz-Kreislaufsystems und jeder Vierte an Krebs. Und noch immer wird die Entwicklung neuer Waffen zur Bekämpfung von imaginären Feinden mit oberster Priorität vorangetrieben. Das ist etwa so, als suche man sein Haus in den Alpen gegen alle erdenklichen äußeren Gefahren einschließlich Wirbelstürmen, Wanderdünen und Hochwasser zu schützen, vergäße aber, etwas gegen den Holzschädling zu unternehmen, der das Gebälk zerfrisst. Diese Vorstellung erscheint auf den ersten Blick abwegig und absurd, und doch entspricht sie der bisherigen Strategie, mit der man das Wohlergehen der Bürger sichern möchte.

Es mag zwar wie eine Plattitüde klingen: Die in der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere der medizinische Fortschritt, stellen die unverzichtbare Basis für die Lösung fast aller dringenden gesellschaftlichen Probleme dar und liefern die Grundlage für eine bessere Lebensqualität für alle Bürger in der Zukunft. Aber warum wird allein im Jahr 2002 fast ein Drittel des Gesamtforschungsbudgets von rund sechs Milliarden Euro in die Wehrforschung und den Aufbau der Internationalen Raumstation gesteckt? Eine solche Prioritätensetzung für die Forschungsförderung ist unbegreiflich.

Genomforschung

Trotz solcher Schieflagen bei der öffentlichen Forschungsförderung insgesamt hat die Genomforschung in Deutschland in den letzten beiden Jahren breite Unterstützung erhalten. Ein Großteil der Mittel stammt aus den Einnahmen, die durch die Versteigerung der Lizenzen für den UMTS-Mobilfunk erzielt wurden, und flossen in das neue Programm „Gesundheitsforschung: Forschung für den Menschen“. Mit diesen Geldern soll die Funktion von Genen wesentlich besser aufgeklärt werden. In dem Zusammenhang wurden für das Nationale Genomforschungsnetz 175 Millionen Euro zur Verfügung gestellt. Da die Entzifferung des Genoms aber erst den Anfang der Genomforschung darstellt, bleibt zu hoffen, dass die Förderung nicht dann nachlässt, wenn die Genomforschung sich nicht mehr in den täglichen Schlagzeilen wiederfindet.

Mit der Bestimmung der Genomsequenz und der jetzt in großem Maßstab ablaufenden Erforschung der Genfunktion haben wir erstmals die Möglichkeit, die komplexen Netzwerke biologischer Prozesse, die über Milliarden von Jahren entstanden sind, global zu analysieren und damit auch wichtige Beiträge zum Verständnis von Krankheiten zu liefern.

Die Genomforschung wird sich in den nächsten Jahren vor allem mit der Analyse der Expressionsprodukte beschäftigen. Weil die Umwandlung der genetischen Information in Proteine zeitlich und räumlich auf vielen Ebenen und mit vielen Modifikationen abläuft, wird der nächste wichtige Schritt darin bestehen, eine Bestandsaufnahme aller dieser Eiweiße einschließlich ihrer dazugehörigen Koordinaten zu erstellen. Mit Hilfe bereits vorhandener Verfahren, den so genannten Hochdurchsatztechnologien, können die gewaltigen Datenmengen erzeugt werden, die zum Simulieren der Lebensvorgänge am Rechner erforderlich sind. Durch die Verarbeitung aller zur Verfügung stehenden Daten und die interdisziplinäre Zusammenarbeit der verschiedenen Forschungsrichtungen wie etwa der Informatik, der Biologie, der Physik und der Chemie wird die Systembiologie das Forschungsgebiet der nächsten Jahre darstellen.

In den Vereinigten Staaten wurden mit der Gründung des ersten Zentrums für Systembiologie in Seattle bereits die Weichen dafür gestellt. Dort arbeiten Wissenschaftler verschiedener Fachrichtungen erfolgreich zusammen unter einem Dach an gemeinsamen Projekten und greifen auf gemeinsame Ressourcen zu. Auch in Deutschland sollte man den Weg, der durch die Förderung der Genomforschung bereits eingeschlagen wurde, weiter ebnen und mit der Schaffung solcher Zentren Wissen effektiv bündeln.

Die ersten Schritte in die richtige Richtung sind gemacht. Aber da niemand vorherzusagen vermag, wie lange der Weg noch sein wird, bleibt nur zu hoffen, dass der Förderung nicht auf halber Strecke die Luft ausgeht. ■

Hans Lehrach ist Professor am Max-Planck-Institut für Molekulare Genetik in Berlin.

NACHGEHAKT

Pisa und der Walser-Effekt

Was jahrelang nur hinter vorgehaltener Hand diskutiert wurde, ist seit Ende letzten Jahres amtlich: Deutsche Schüler schneiden in den Bereichen Leseverständnis sowie mathematische und naturwissenschaftliche Grundbildung im internationalen Vergleich miserabel ab.

Jetzt legte der neue Teil der Pisa-Studie noch eins drauf: Die Unterschiede in den Leistungen der Schüler, nach Bundesländern aufgeschlüsselt, sind eklatant. Dieses Ergebnis birgt aufgrund unseres föderalen Bildungssystems erheblichen Zündstoff.

Die Bildungspolitiker reagierten denn auch mit altbekannten Reflexen: Stärken der einzelnen Bundesländer wurden jeweils auf die eigene parteipolitische Fahne geschrieben, Mängel (der anderen, versteht sich) auf das Versagen des politischen Gegners zurückgeführt. Schließlich ist Wahlkampf in Deutschland.

Und die Medien beteiligten sich pflichtbewusst an diesem Gezänk. Dabei unterlagen Politiker wie Journalisten erneut dem Walser-Effekt: Jeder diskutiert mit, doch kaum jemand hat das Werk zuvor gelesen. So, wie Politiker Politik nicht für den Wähler, sondern gegen den Konkurrenten machen, schreiben Zeitungen nicht für den Leser, sondern gegen den Mitbewerber auf dem Medienmarkt. Deshalb ist Schnelligkeit Trumpf. Meinungen müssen her. Es gilt, die Lücke zu besetzen, bevor es der andere tut.

Es wird einige Zeit dauern, bis Vernunft und Sachlichkeit in die Diskussion zurückgekehrt sind. Wer es ernst meint mit Reformen des Bildungssystems, wird an starren Strukturen rütteln müssen. Nationale Bildungsstandards und übergeordnete Qualitätssicherung dürfen trotz der Hoheit der Bundesländer über die Schulpolitik kein Tabu mehr sein.

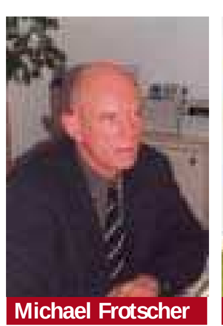
Bildung ist eben kein Problem der einzelnen Länder. Sie geht uns alle an – unabhängig davon, ob wir in Bayern oder Bremen wohnen.

Uwe Reichert

JUNG-STIFTUNG-MEDIZINPREIS

Was geht in unseren Köpfen vor?

Was geschieht in den Nerven des Gehirns, wenn Informationen abgespeichert werden? Wie stehen die Nervenzellen miteinander in Kontakt? Das Wissen um solche grundlegenden Mechanismen der Funktion und Struktur des Gehirns sind notwendig, um Störungen wie Demenzerkrankungen oder traumatische Schädigungen verstehen zu können. Wichtige Entdeckungen in der Entwicklung des zentralen Nervensystems sind Michael Frotscher gelungen. Dafür erhält der Direktor des Anatomischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg den diesjährigen Medizinpreis der Ernst-Jung-Stiftung; er teilt ihn sich mit Christian Haass vom Adolf-Butenandt-Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München.


Michael Frotscher


Christian Haass

LMU

Die nach dem Hamburger Kaufmann Ernst Jung benannte Stiftung verleiht jährlich den mit 250 000 Euro dotierten Preis für Durchbrüche in der medizinischen Forschung, die sich in neue Therapiemöglichkeiten umsetzen lassen.

Michael Frotscher untersucht an Mäusen einen speziellen Bereich des Gehirns, den Hippocampus. Diese Zone spielt eine zentrale Rolle bei Lern- und Gedächtnisprozessen. Hier sitzen unter der Oberfläche Steuerungszellen (siehe die Zeichnung unten). Sie produzieren ein Protein namens Reelin, das die Entwicklung von nachwachsenden Nervenzellen regelt. Der Freiburger Professor erkannte wichtige Mechanismen, welche die Wanderung der Nerven nach ihrer Entstehung und die Kontaktaufnahme der Nervenzellen untereinander steuern. Beides sind grundlegende Vorgänge in der Ausbildung von Nervennetzen und in der Regeneration von Nervenzellen.

Nach dem Medizinstudium an der Humboldt-Universität Berlin begann Frotscher seine wissenschaftliche Laufbahn am dortigen Institut für Anatomie. Forschungsaufenthalte führten ihn zunächst nach Budapest, bevor er 1979 am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt am Main eine neue berufliche Heimat fand. Nach Professuren in Frankfurt und Heidelberg sowie Arbeitsaufenthalten an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) folgte er schließlich 1989 dem Ruf an das Anatomische Institut der Universität Freiburg.


GUSTAF RETZIUS

Direkt unter der Hirnoberfläche befinden sich waagrecht verlaufende Zellen, die das Glykoprotein Reelin produzieren. Dieses steuert die Schichtung und Verknüpfung der tiefer liegenden, senkrecht verlaufenden Nervenzellen.

Der Neurobiologe Haass hat wesentlich beigetragen zur Aufklärung der pathologischen Vorgänge bei der Entstehung der Eiweiße, welche die beiden Demenzkrankheiten Alzheimer und Parkinson verursachen. Er studierte und promovierte in Heidelberg. Nach einem mehrjährigen Forschungsaufenthalt an der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts) wurde er zunächst Professor für Molekularbiologie an der Universität Heidelberg und folgte 1999 einem Ruf an den Lehrstuhl für Biochemie am Adolf-Butenandt-Institut der Universität München. ■

ZOOLOGIE

Jacques Perrin (Bilder),
Jean-François Mongibeaux (Text)

Nomaden der Lüfte

Aus dem Französischen von Marion Pausch.
Gerstenberg, Hildesheim 2002. 270 Seiten, € 54,–

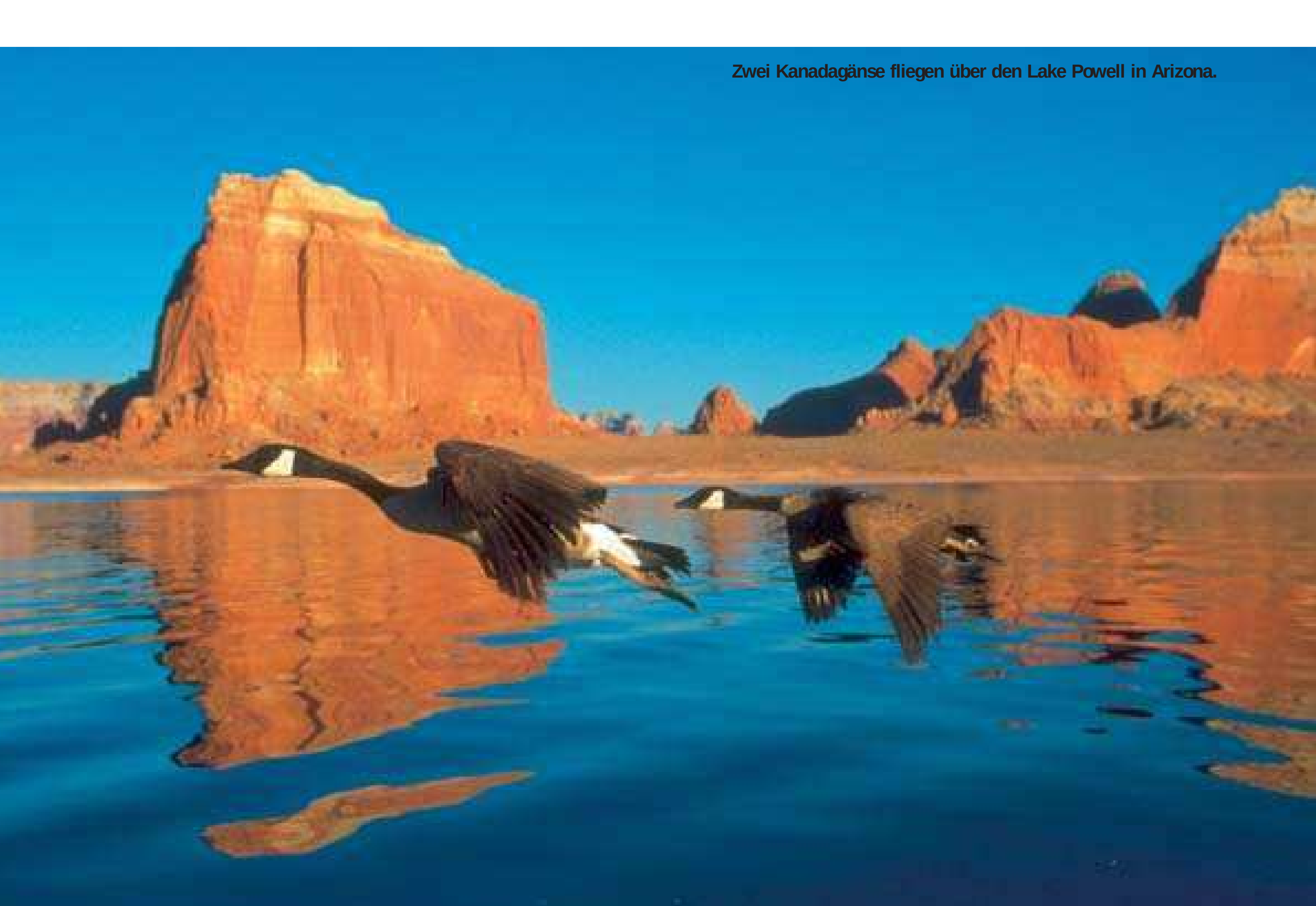
Man könnte meinen, Vögel seien in Mode gekommen. Erst Christian Moullecs Bildband „Mit den wilden Gänsen fliegen“ und jetzt das Buch zum Film „Nomaden der Lüfte“ (Kinostart 4. April 2002) von Jacques Perrin. Die allgemein zunehmende Begeisterung für unsere gefiederten Freunde ist verständlich: Es geht um eines der geheimnisvollsten und beeindruckendsten Phänomene der Tierwelt überhaupt, den Vogelzug.

Der Franzose Jacques Perrin überzeugte bereits 1996 durch seinen mehrfach preisgekrönten Film „Mikrokosmos“ über das Leben von Insekten auf einer Wiese. Mit „Nomaden der Lüfte“ realisierte er eine der aufwendigsten Tierdokumentationen aller Zeiten. Seit 1997 haben acht Teams in mehr als 25 Ländern rund um den Globus etwa vierzig verschiedene Zugvogelarten gefilmt. Perrins gleichnamiges Buch zeigt in fantastischen Bildern fast alle Aspekte eines Zugvogellebens – wohlgemerkt hauptsächlich aus der Vogelperspektive.

Fünfzig Milliarden Vögel ziehen jedes Jahr von Kontinent zu Kontinent, überwinden dabei Meere und Gebirge und legen Strecken von einigen tausend bis zu 20 000 Kilometern zurück. So entsteht ein Netz aus unzähligen Flugrouten, das den gesamten Globus überspannt. Woher wissen die Langstreckenflieger, wann sie aufbrechen müssen und welchen Weg sie einzuschlagen haben? Folgen sie etwa einer inneren Uhr, richten sie sich nach topografischen Landmarken, den magnetischen Polen oder den Gestirnen? Jacques Perrin schreibt dazu: „Tiere erben das Wissen von ihren Vorfahren … Nach wenigen Monaten finden sie Zugrouten, die sie nie zuvor benutzt haben.“

Peter Berthold, der Leiter der international renommierten Vogelwarte Radolfzell am Bodensee, der mit Hilfe modernster Satelliten-Telemetrie zahlreiche Vogelwanderungen verfolgt hat (Spektrum der Wissenschaft 6/2002, S. 52), kann diesen Befund bestätigen: Das Zugverhalten ist genetisch bedingt und – Vögel besitzen das Potenzial sowohl für das Ziehen als auch für das Nichtziehen. Durch Selektion ergibt sich daraus die gesamte Palette von phänotypischen Standvögeln über teilziehende Populationen bis hin zu ausschließlich wandernden Langstreckenziehern.

Der französische Wissenschaftsjournalist und Autor Jean-François Mongibeaux, der die dreijährigen Filmarbeiten begleitete, verfasste für den vorliegenden Bildband einen gelungenen Text, der die faszinierenden Bilder auf hervorragende Weise ergänzt. Populärwissenschaftlich stellt er die verschiedensten Vogelarten mit ihren Besonderheiten vor. Vier Hauptkapitel vermitteln – gut verständlich – das ornithologische Wissen unserer Zeit: „In Gesellschaft der Gefiederten“, „Im Takt des Flügelschlags“, „Reisende durch Zeit und Raum“ und „Die Eroberer unseres Planeten“. Immer wieder bekommen aber auch mitwirkende Biologen, Tierpfleger, Tontechniker oder Kameraleute die Gelegenheit, ihre Erinnerungen und Eindrücke während der Dreharbeiten zu schildern. Mongibeaux verschont seine Leser mit la-


Zwei Kanadagänse fliegen über den Lake Powell in Arizona.

teinischen Artnamen und anderen allzu wissenschaftlichen Details. Unter der immer wiederkehrenden Rubrik „Wissenswertes“ werden – ebenfalls leicht verdaulich – ornithologische Fakten genannt. Manch andere Textpassage mutet dagegen geradezu überschwänglich an.

Ganzseitige Karten stellen abschließend die Routen ausgewählter Zugvogelarten von Europa bis Nordafrika, in Nord- und Südamerika, in Asien sowie rund um den Südpol vor. Versehen sind sie mit viel artspezifischem Hintergrundwissen in Steckbriefform. Kartenausschnitte informieren außerdem über ganzjährige Vorkommen, Verbreitungs- und Brutgebiete sowie über die Winterquartiere.

Wie schon in „Mikrokosmos“ verwöhnt Perrin uns mit eindrucksvollen, zum Teil sogar poetischen Bildern aus ungewöhnlichen Perspektiven. Der großformatige und schwergewichtige Band (immerhin 29 mal 35 Zentimeter und 2,7 Kilogramm) zeigt neben sensationellen Aufnahmen von Vögeln während des Fluges auch stillere Impressionen – Störche bei der Rast in der Libyschen Wüste, brütende Königspinguine auf den Falklandinseln, Schneegänse auf Futtersuche im Uferschlamm der französischen Atlantikküste. Dann wieder Interaktionen: ungewöhnliche Rituale und Tänze balzender Mandschurenkraniche, klappernde und schnäbelnde Weißstörche in der Normandie. Und immer wieder Vögel im Flug: allein, in typischer V-Formation oder als ungeordneter Trupp. Nur die Landschaften sind immer andere. Bilddoppelseiten wechseln ab mit beidseitig ausklappbaren Panoramaseiten – beinahe jede Aufnahme ist ein nie gesehenes Highlight. Fast wird es zu viel des Guten, wirkt beim Durchblättern ermüdend.

Die Frage nach der Technik, die solche Bilder entstehen lässt, drängt sich auf. Und wird auch prompt im letzten Kapitel „Abenteuer Film“ beantwortet. Nicht nur die Fotos wilder, frei lebender Vögel sind es, die uns begeistern. Vielmehr wurden die meisten der späteren Hauptdarsteller eigens für das Projekt aufgezogen. Die Eier stammten vornehmlich aus internationalen Vogelparks. Ausgefeiltes Equipment wie flugtaugliche und computergestützte Inkubatoren kam für den Transport und das Ausbrüten der Eier zum Einsatz. Für die Film- und Fotoarbeiten setzte man die unterschiedlichsten Luftfahrzeuge ein: neben Hubschraubern, Gleitschirmen, Segelflugzeugen auch Drachen, Heißluftballons und ferngesteuerte Modellflugzeuge.

Jacques Perrin will berühren, Emotionen wecken. Das ist ihm mit großer Sicherheit und viel Gespür abermals gelungen. Doch sollten die wunderschönen Bilder nicht darüber hinwegtäuschen, dass seine Protagonisten es nicht leicht haben. Denn die Zerstörung ihrer Lebensgrundlagen, sei es im Überwinterungsgebiet, im Sommerquartier oder auf der Rast, schreitet immer weiter voran. Zugvögel sind zwar in der Tat Nomaden der Lüfte; zum Überleben, zur Aufzucht ihrer Jungen und zur Nahrungsaufnahme sind aber selbst diese Anpassungskünstler auf Lebensräume am Boden und in und auf dem Wasser angewiesen. Hier stehen sie in direkter Konkurrenz zu uns Menschen. Und sogar in der Luft sind sie vielfältigen Gefahren ausgesetzt, denkt man nur an die steigende Anzahl von Windparks und Hochspannungsleitungen in unseren Landschaften. Selbst der namhafte Tierfilmer und Zoologe Heinz Sielmann, der das Geleitwort zum Buch schrieb, erwähnt diese Problematik leider mit keiner Silbe.

Susanne Hufmann

Die Rezensentin ist Biologin und arbeitet bei der Hessischen Gesellschaft für Ornithologie und Naturschutz in Rodenbach.

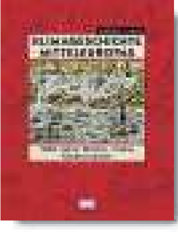
GESCHICHTE

Rüdiger Glaser

Klimageschichte Mitteleuropas

1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen

Primus, Darmstadt 2001. 227 Seiten, € 39,90



Berichte über sintflutartige Regenfälle mit nachfolgenden Überschwemmungen, schwere Stürme in zuvor wenig betroffenen Regionen, zu warme Winter und die fortschreitende Ausbreitung von Wüstengebieten tauchen immer öfter in den Nachrichten auf. Sind diese regionalen Exzesse des Wetters normale Erscheinungen oder die Folge einer Klimaveränderung und möglicherweise durch die Aktivität der Menschen verursacht?

Die Wettervorhersage und ihre Vertrauenswürdigkeit kennt jeder aus den Medien. Mehr als drei Tage in die Zukunft ist das Wetter kaum zu prognostizieren. Wie aber macht man eine brauchbare Wetterrückschau, und das über tausend Jahre hinweg?

Voraussetzung für jede Rekonstruktion ist eine ausreichend lange Messreihe in der Nähe der Gegenwart. Die verfügbaren exakten Messungen von Klimaparametern liegen aber ausgerechnet in der Zeit der größten Klimaänderungen und des größten menschlichen Einflusses. Vor dem Zweiten Weltkrieg gab es in Europa nur wenige und ungleichmäßig verteilte Messstellen, sodass sich ein flächendeckendes Bild der klimatischen Verhältnisse nur schwer rekonstruieren lässt. Im meteorologischen Standardintervall 1961 bis 1990 stehen immerhin schon über 700 Messstationen in Europa zur Verfügung, aber auch die Veränderungen durch den Menschen im Vordergrund.



Die das Klima steuernden Faktoren sind erstaunlich vielfältig: von den astronomischen Daten der Erdbahn und der Sonnenaktivität über geologisch-tektonische Vorgänge wie Gebirgsbildung und Vulkanismus bis hin zu Bodenbildung und Bewuchs. Schließlich nimmt der Mensch durch seine Flächennutzung Einfluss.

In dieser unübersichtlichen, fast chaotischen Datenlage versucht der Würzburger Geograf Rüdiger Glaser unter Einbeziehung aller verfügbaren Messprotokolle und historischen Daten eine Rekonstruktion der letzten tausend Jahre Klimageschichte. In einer zehnjährigen Sisyphusarbeit hat er alle erdenklichen historischen Quellen zusammengetragen und mit den physikalischen Messdaten in einer Datenbank vereinigt. Unter anderem hat er historische Archive durchstöbert, Bilder von besonderen Ereignissen ausgewertet und Baumringanalysen herangezogen.

Der erste, methodenkritische Teil des Buches zeigt, mit welchem Aufwand versucht wurde, fehlende Messwerte zu rekonstruieren und zu verifizieren. Dabei wird aber auch klar, dass diese Daten kritisch gewertet werden sollten.

Der darauf folgende Hauptteil enthält spannend rekonstruierte regionale Kataloge der Witterungsanomalien der letzten tausend Jahre mit Auswirkungen auf die Menschen und deren eventuelle Ursachen und dürfte für alle, die sich für die Geschichte ihrer Heimat interessieren, von Bedeutung sein.

In seinem Resümee verschweigt Glaser nicht, dass die Erwärmung der letzten 150 Jahre („das Moderne Klimaoptimum“) vor allem wegen der Erhöhung der Wintertemperaturen „in der Zusammenschau der letzten tausend Jahre in ▶

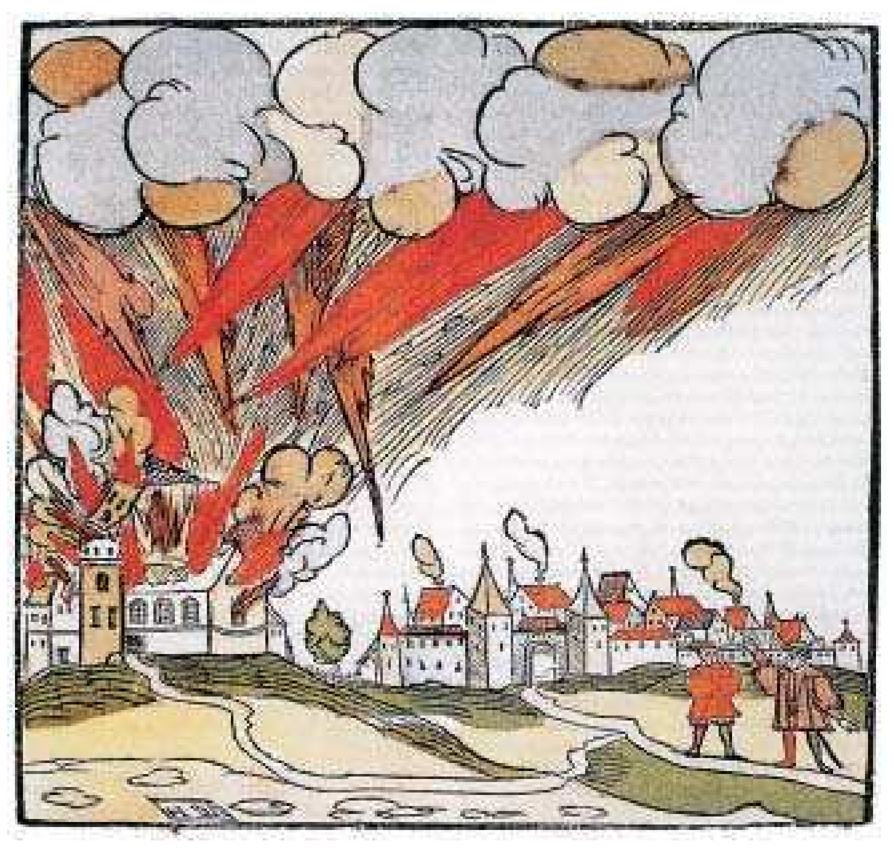
dieser Form einmalig ist und wohl auf die anthropogene Erhöhung des Treibhauseffekts zurückzuführen ist“. Aber dennoch: Veränderlichkeit war und ist das Wesensmerkmal des mitteleuropäischen Klimas. „Es gibt keinen als ‚normal‘ zu bezeichnenden Abschnitt, … in dem nicht auch die unterschiedlichsten Extreme aufgetreten wären.“

Glaser hat in diesem Band in verständlicher Form die Problematik der Klimarekonstruktion dargelegt und die regionalen Zeitreihen mit aussagekräftigen Abbildungen gewürzt: Ein wertvoller Beitrag zur Klimadebatte und zum Verständnis der Klimaentwicklung.

Für die weitere Forschung in der (Paläo-)Klimarekonstruktion wünsche ich mir über das bisherige statistische Standardwerkzeug – das gleitende Mittel über dreißig Jahre – hinaus den verstärkten Einsatz von Methoden, die der dynamischen Natur unserer Wetterküche mehr Rechnung tragen, insbesondere die Fourier-Analyse und die Modellierung mittels Markow-Ketten.

Klaus Fassl

Der Rezensent ist promovierter Botaniker und Wissenschaftsjournalist in Sindelfingen.



Eine Flugschrift illustriert das Gewitter am 29. Dezember 1555 in Altenburg (Sachsen).

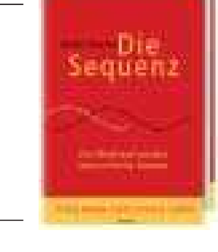
BIOLOGIE

Kevin Davies

Die Sequenz

Der Wettlauf um das menschliche Genom

Aus dem Englischen von Klaus Fritz und Anja Hansen-Schmidt.
Hanser, München 2001. 416 Seiten, € 24,90



Mit einer Art von postmodernem Hofzeremoniell ging am 26. Juni 2000 ein Jahrhundert in der Geschichte der Biologie zu Ende. In Gegenwart des amerikanischen Präsidenten Bill Clinton und – über TV zugeschaltet – des britischen Premierministers Tony Blair traten die Kapitäne zweier rivalisierender Teams vor die Medien der Welt und verkündeten den Abschluss des Rennens um die Aufklärung des menschlichen Erbgutes. Große Worte waren wohlfeil zu haben: „wichtigste menschliche Errungenschaft seit Erfindung des Rades“, „wichtiger als die Landung auf dem Mond“, ja von einer „zweiten Schöpfung“ war die Rede. Überhaupt hatte das Mythische und Religiöse eine Sternstunde: „Wir stehen vor dem Wunder von Gottes höchstem und heiligstem Geschenk“, so Präsident Clinton; oder: „Es macht mich demütig und ehrfürchtig, dass wir einen ersten Blick auf unseren eigenen Bauplan werfen, den vorher nur Gott gekannt hat“, so Francis Collins, einer der beide Kapitäne.

Was war geschehen?

Seit James Watson und Francis Crick 1953 die Struktur der DNA beschrieben, hat die Gentechnik ungeheure Fortschritte gemacht. Mit ihrer Hilfe sind Isolierung und Untersuchung jedes Gens möglich, jedenfalls von Genen, die man sich vorstellen kann. Die Erfolge gerade im Bereich der Humangenetik waren überwältigend: Einige tausend menschliche Gene wurden bekannt, darunter viele, die, wenn durch Mutation verändert, menschliche Erbkrankheiten verursachen. Aber die traditionelle Gentechnik hat ihre Grenzen, denn viele Krankheiten werden durch Störungen in einem Netzwerk von einander beeinflussenden Genen bestimmt, darunter von Genen, die man sich eben nicht so ohne weiteres vorstellen kann. Hier kann man nur weiterkommen, wenn man möglichst alle Gene des Menschen kennt. Vor diesem Hintergrund wurde in den 1980er Jahren erstmals die Idee diskutiert, die Gesamtheit der menschlichen Gene aufzuklären, also das gesamte menschliche Genom mit seinen DNA-Strängen aus zusammen über drei Milliarden Bausteinen.

Von vornherein war klar, dass ein Human-Genom-Projekt einen gewaltigen Aufwand erfordern würde. Immerhin dauerte Anfang der 1980er Jahre selbst die Entzifferung eines vergleichsweise winzigen Bakteriengenoms noch viele Monate bis Jahre. Überdies wusste man, dass Gene nur wenige Prozent der gesamten DNA ausmachen. Der größte Teil der DNA besteht aus informationsleeren Strecken, die zudem noch die informationstragenden DNA-Stränge der meisten Gene unterbrechen.

Aus zweifelhaften Anfängen wurde dann doch ein erfolgreiches Unternehmen, zuerst geleitet vom charismatischen James Watson, der dann verärgert seinen Platz für Francis Collins freimachte. Der erfolgreiche, aber doch gemächliche Verlauf änderte sich jäh, als der Störenfried Craig Venter die Bühne betrat, der das ganze Vorhaben schneller, billiger und ge-

nauer durchführen wollte – und vorher in einer Art von Fingerübungen mit Bakterien- und Fliegengenomen gezeigt hatte, dass er dazu auch in der Lage ist. Diese Geschichte samt dem Motivationsgemisch aus wissenschaftlichem Ehrgeiz, persönlichem Geltungsbedürfnis und Geschäftssinn, das die Beteiligten trieb, beschreibt Kevin Davies in seinem Buch.

Er hat das alles aus der Nähe beobachten können, denn er war einer der Gründer

Die vorliegende Sequenz hat noch viele peinliche Lücken

der Zeitschrift „Nature Genetics“ und leitet jetzt den Verlag Cell Press, wo einflussreiche wissenschaftliche Arbeiten auch im humangenetischen Bereich erscheinen. So kann er aus intimer Kenntnis die geradezu atemberaubende Entfaltung der molekularen Humangenetik beschreiben, die dramatischen Ereignisse bei der Entdeckung medizinisch wichtiger Gene, die zunehmende Rolle der molekularen Genetik für die Gerichtsmedizin und die Erforschung der menschlichen Vor- und Frühgeschichte, schließlich das aufregende Rennen um die Entzifferung des Humangenoms.

Davies ist ein aufmerksamer und kritischer Zeuge dieser Ereignisse und zugleich ein meisterhafter Erzähler, der Fachleuten wie Nichtfachleuten etwas zu sagen hat. Fachleute erhalten eine gute Zusammenfassung einer spannenden Periode in der Geschichte der Wissenschaften und lernen nebenher, wie sich komplizierte Sachverhalte in der Öffentlichkeit darstellen lassen, und zwar sowohl mit Leichtigkeit als auch mit Genauigkeit. Das Buch enthält ein ausführliches Personen- und Sachregister sowie 800 Hinweise auf Artikel in Fachzeitschriften und auf Zeitungs- und Fernsehinterviews, Informationsquellen, die selbst den fachlich Interessierten nicht ohne weiteres bekannt sind. Und die Nichtfachleute, für die dieses Buch geschrieben wurde, werden ihre Freude an der lockeren, weil personenbezogenen Darstellung haben.

Davies weiß auch die eingangs erwähnten Feierlichkeiten ins richtige Maß zu setzen, indem er einen Reporter zitiert: „Ich wundere mich ein wenig über den Zeitpunkt. Sie haben 97 Prozent des Genoms kartiert, 85 Prozent sequenziert und (gerade einmal) 24 Prozent fertig gestellt. Wieso wählen Sie diesen Zeitpunkt für die Bekanntgabe?“ Michael Morgan, Direktor des Genetikprogramms beim britischen Wellcome Trust (einem Hauptfinancier des Human-Genom-Projektes), ver- ▶

mutet, es sei der einzige Zeitpunkt gewesen, an dem sowohl Clinton als auch Blair einen Platz im Terminkalender hatten.

Die wissenschaftliche Veröffentlichung kam dann auch erst im Februar 2001, diesmal getrennt: das durch öffentliche Mittel geförderte internationale Human-Genom-Projekt in der hochangesehenen Zeitschrift „Nature“, Venters Privatfirma Celera Genomics in der ebenso hochgeschätzten Zeitschrift „Science“. Über die fachlichen Details hinaus wird aus beiden Berichten deutlich, wie begrenzt das bisher gewonnene Wissen ist. Die vorliegende Sequenz hat noch viele, oft geradezu peinliche Lücken; selbst eine so nahe liegende Frage wie die nach der Zahl der menschlichen Gene kann noch lange nicht genau beantwortet werden: Sind es nur wenig über 30 000 oder vielleicht doch eher 50 000?

Immerhin: Mit dem Katalog des Humangenoms haben Forscher jetzt eine gute Ausgangsposition, um Ordnung und Verstehen in das Gewirr der Beziehungen zu bringen, vielleicht vergleichbar mit der Situation von Literaturwissenschaftlern, die einen langen Text in einer fremden Sprache verstehen möchten, aber erst jetzt in den Besitz eines geeigneten Wörterbuches gekommen sind.

Rolf Knippers

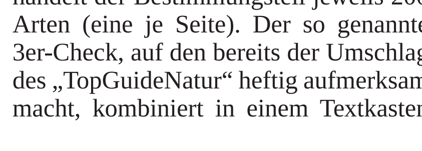
Der Rezensent ist Professor für Molekulare Genetik an der Universität Konstanz.

NATURFÜHRER

Einhard Bezzel
Vögel
Treffsicher bestimmen mit dem 3er-Check
BLV, München 2001. 238 Seiten, € 9,95

Dankwart Seidel
Blumen
Treffsicher bestimmen mit dem 3er-Check
BLV, München 2001. 238 Seiten, € 9,95

Ulrich Hecker
Bäume & Sträucher
Treffsicher bestimmen mit dem 3er-Check
BLV, München 2001. 238 Seiten, € 9,95



Biodiversität ist einer der neueren Trendbegriffe und die griffige Verpackung eines im Prinzip einfachen Sachverhalts: Artenfülle ist – wo sie noch besteht – nur schwer beherrschbar. Indes werden viele Zeitgenossen die Diskussion um den Artenschwund kaum nachvollziehen können, weil sie ihn nicht wahrnehmen. Wer selbst die gewöhnlichsten Arten der mitteleuropäischen Siedlungslandschaft nicht kennt, wird sie in seinem Umfeld auch nicht vermissen. Bedenklich stimmt, dass nach vorliegenden Erhebungen selbst Studienanfänger der Biologie kaum zwei Dutzend heimische Gehölzarten zuverlässig benennen können.

Das Interesse an der qualifizierten Wahrnehmung der Natur (oder was man dafür hält) ist indessen ungebrochen. Die breite Palette von Naturführern, die Vielfalt zeigen und Bestimmungshilfen anbieten, sind zweifellos ein klares Signal dafür. Bildgeführt und mit kurzen diagnostischen Skizzen versehen präsentieren sie kataloghaft eine Auswahl von Arten, die zwischen Flensburg und Füssen in der heimischen Natur zu erleben sind.

Diesem generellen Buchprofil entsprechen auch die vorliegenden Neuerscheinungen, die von anerkannten Fachleuten geschrieben sind. Nach einem Einführungsteil (etwa zwanzig Seiten) behandelt der Bestimmungsteil jeweils 200 Arten (eine je Seite). Der so genannte 3er-Check, auf den bereits der Umschlag des „TopGuideNatur“ heftig aufmerksam macht, kombiniert in einem Textkasten jeweils drei artspezifische Merkmale (bei den Vögeln Schnabelfarbe, Bauchgefieder und Beingestalt), die in briefmarkengroßen Detailfotos nochmals visualisiert werden. Häufig bieten sie Ausschnitte von Gestaltmerkmalen, die bereits im größeren Habitusbild hinreichend deutlich zu erkennen sind.

Die jeweils vorgenommene Artenauswahl (Blumen ungefähr zehn, Vögel fünfzig, Bäume und Sträucher siebzig Prozent des heimischen Artenbestandes, bei den Gehölzen einschließlich etlicher eingeführter Arten) leistet natürlich keine Komplettinventur der Flora oder Fauna, bietet jedoch eine erste hilfreiche Umschau und genügt für die Alltagsroutine vollauf. Sympathisch sind das mitnahmefreundliche Taschenformat und der robuste Umschlag: Das Buch wird keinen großen Schaden nehmen, wenn es den Händen einmal in die feuchte Wiese entgleiten sollte.

Bruno P. Kremer

Der Rezensent ist Hochschullehrer am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität zu Köln und selbst Autor von Naturführern.

ZOOLOGIE

Robert M. Sapolsky
Mein Leben als Pavian
Erinnerungen eines Primaten
Aus dem Englischen von Ulrich Enderwitz.
Claassen, München 2001. 456 Seiten, € 21,–



Ursprünglich wollte Robert Sapolsky Berggorilla werden. Heute ist er immerhin Professor für Biologie und Neurologie an der renommierten Stanford-Universität in Kalifornien; in der Welt der nicht-menschlichen Primaten ist er jedoch nie über den Status eines gewöhnlichen, rangniedrigen Pavians hinausgekommen.

Mit 21 Jahren reist Sapolsky erstmals nach Afrika und schließt sich einer Horde von Anubis-Pavianen an. Nachdem Salomon, das Alphamännchen der Herde, ihm seinen niederen Rangplatz unmissverständlich deutlich gemacht hat („einmal langte er auch mir eine, sodass ich von einem Felsen herunterfiel“), verlegt sich Sapolsky darauf, der „Schrecken der Pa-

viane“ zu werden. Bewaffnet mit einem Blasrohr und Betäubungspfeilen stellt er den Tieren nach, betäubt sie und entnimmt ihnen eilig eine Blutprobe, aus der dann die Konzentration von Stresshormonen bestimmt wird. Das wissenschaftliche Ziel ist es, den Zusammenhang zwischen sozialen Faktoren und stressbedingten Erkrankungen zu erforschen. Die zentrale Frage „Warum kommen einige Tiere besser mit Stress zurecht als andere?“ versucht der Verhaltensbiologe mit Blick auf die unterschiedlichen Lebenserfahrungen und Strategien der Paviane zu beantworten. Dazu beobachtet Sapolsky frei lebende Paviankolonien mit über sechzig Tieren, die häufiger auf Grund sozialer Differenzen als durch Raubfeinde unter Stress geraten. Somit stellen Paviane mit ihrer komplexen sozialen Organisation auch ein perfektes Modell für stressbedingte Erkrankungen beim Menschen dar. „Es geht uns so gut, dass wir uns den Luxus leisten können, aus Gründen eines rein sozialen, psychologischen Stresses krank zu werden. Genau wie diese Paviane.“

Nebukadnezar ist „ein dummes, unbegabtes Scheusal“

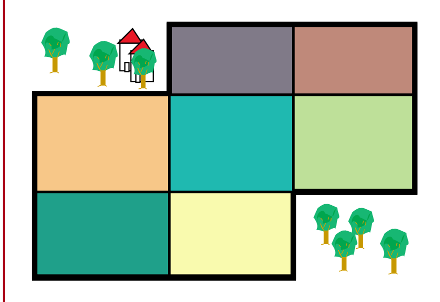
Das vorliegende Buch schildert auf unterhaltsame Weise die Erfahrungen mit Affen und Menschen, die Sapolsky während der letzten zwanzig Jahre in Afrika gesammelt hat. Dabei ist der Untertitel des Buches („Erinnerungen eines Primaten“) wesentlich zutreffender als der Titel („Mein Leben als Pavian“), denn nicht einmal die Hälfte des über 450 Seiten umfassenden Werkes hat tatsächlich etwas mit Pavianen zu tun. Dazwischen eingestreut sind Geschichten in essayistischem Stil, die teilweise durchaus ernsthafter und sozialkritischer Natur sind.

Zahlreiche, oft skurrile Erlebnisse aus der Begegnung zwischen unserer westlichen und der afrikanischen Kultur beschreibt Sapolsky mit der professionellen Distanz des Verhaltensbiologen. Zugegeben, oft kann er der Verlockung nicht widerstehen und greift aktiv in das Geschehen ein, wodurch er das Absurde auf die Spitze treibt. So versorgt er das Personal des benachbarten Touristencamps gezielt mit Informationen über moderne Transplantationstechnik, worauf die Angestellten sich in den Glauben versteifen, einer der Touristen sei komplett durch Ersatzteile ausgetauscht worden. Aber insgesamt fällt positiv auf, dass Sapolsky weder mit westlicher ▶

PREISRÄTSEL

Flurbereinigung

von Natalie van Eijk



Jan hat seinen achteckigen Acker durch vier gerade Linien in sieben rechteckige Parzellen geteilt. Jede dieser Parzellen hat einen ganzzahligen Flächeninhalt zwischen einem und neun Ar, und keine zwei Parzellen haben den gleichen Flächeninhalt.

Welchen Flächeninhalt hat Jans achteckiger Acker?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Würfelsets „Baumbestimmungswürfel“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. August 2002, eingehen.

Lösung zu „Dreiecksverhältnisse“ (Juni 2002)

Es gibt nicht viele Dreiecke, welche die Bedingungen der Aufgabe erfüllen: Seitenlängen hübsch und klein, das heißt ganzzahlig, teilerfremd und höchstens 20, und ein Winkel (α) doppelt so groß wie ein anderer (β).

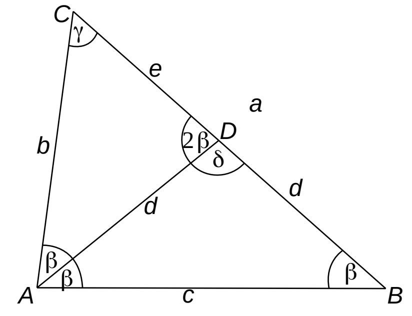
Neben (6; 4; 5) sind die einzigen Lösungen (12; 9; 7), (15; 9; 16) und (20; 16; 9).

Wer mit dem Cosinus- oder Sinussatz arbeitete, kam ebenso ans Ziel wie diejenigen, die mit einfachen Ähnlichkeiten argumentierten.

Erhard Wilke aus Berlin zeichnete die Winkelhalbierende durch A ein. Nach der Voraussetzung müssen die dabei entstehenden Winkel gleich β sein. Der Winkel ADC zwischen den Schenkeln d und e ist 2β, denn $\delta = 180° - 2\beta$ (Winkelsumme im gleichschenkligen Dreieck ABD mit den beiden Winkeln β).

Weil sie gleiche Winkel haben, sind die Dreiecke ABC und DAC ähnlich. Aus $a/b=b/e$ folgt umgeformt $e=b^2/a$, und aus $a/c=b/d$ folgt $d=bc/a$. Da $e+d=a$ ist, folgt $a=(b^2+bc)/a$ und daraus die gewünschte Gleichung, die einen Zusammenhang zwischen den Seiten herstellt: $a^2=b(b+c)$.

Die Lösungen (a; b; c) dieser Gleichung müssen den Dreiecksungleichungen $b+c>a$ und $a+b>c$ genügen. Außerdem müssen sowohl b als auch ($b+c$) Quadratzahlen sein.



Warum? Wenn b und ($b+c$) einen gemeinsamen Teiler hätten, so würde dieser auch c teilen und nach der Gleichung auch a^2. Also gäbe es einen gemeinsamen Teiler von a, b und c, was der Voraussetzung widerspricht.

Die Primfaktoren von a^2 kommen sämtlich paarweise vor. Wegen der Teilerfremdheit kann aus einem Paar dieser Primfaktoren nicht der eine in b und der andere in ($b+c$) enthalten sein. Also enthalten sowohl b als auch ($b+c$) jeden ihrer Primfaktoren paarweise und sind damit selbst Quadratzahlen. Mit den wenigen Quadratzahlen unter 20, die für b und ($b+c$) in Frage kommen, führt Ausprobieren rasch zum Ziel.

Die Gewinner der fünf Spiele „Brain Twister“ sind Roland Jung, Bischofsheim; Günther Schellhorn, Wolfenbüttel; Gabriela Decker, Graben-Neudorf; Wolfgang Alb, Berlin; und Helmut Müller, Essen.

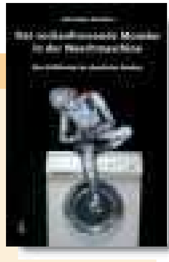
Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.



Arroganz auf das nicht-technisierte Afrika blickt noch in eine Romantisierung der naturverbundenen Bevölkerung verfällt.

Auch was die Affen angeht, zieht der Biologe eine spannende Erzählweise einer rein wissenschaftlich beschreibenden Sprache vor. So haben die Hauptakteure unter den Pavianen Namen, die dem Alten Testament entnommen sind. Damit verletzt Sapolsky nicht nur vorsätzlich die religiösen Gefühle seines ehemaligen Hebräischlehrers, sondern er verlässt durch bewusste Anthropomorphisierung den Pfad der wissenschaftlichen Objektivität. Wohlgemerkt, er will hier eben nicht eine wissenschaftliche Beschreibung einer Paviankolonie liefern (in seinen fachwissenschaftlichen Publikationen sind die Tiere mit neutralen Nummern gekennzeichnet), sondern auch dem nicht fachkundigen Leser komplexe soziobiologische Phänomene vermitteln.

Sapolsky versieht die Akteure mit sehr menschlichen Charaktereigenschaften: Deborah ist „voll Selbstbewusstsein“, Aaron ist „ein anständiger Kerl“ und Nebukadnezar ein „dummes, unbegabtes Scheusal“. Entsprechend ihrem Charakter reagieren die Paviane auch unterschiedlich auf die Anforderungen ihrer sozialen und ihrer natürlichen Umwelt, der Serengeti. Für seine Fragestellungen ist dieser Punkt essenziell, denn es geht ja gerade darum, wie unterschiedliche Dispositionen sich stressphysiologisch ausprägen.



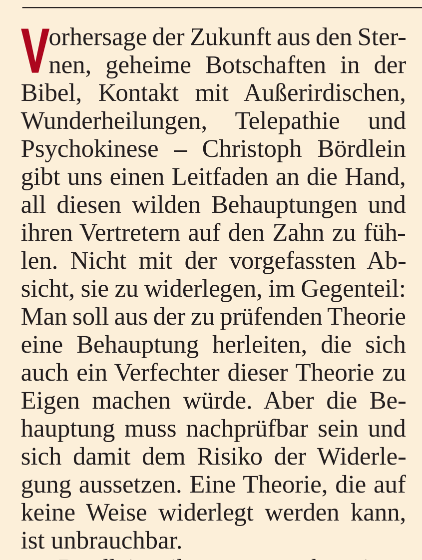
ESOTERISCHES

Christoph Bördlein

Das sockenfressende Monster in der Waschmaschine

Eine Einführung ins skeptische Denken

Alibri, Aschaffenburg 2002. 200 Seiten, € 14,–



Vorhersage der Zukunft aus den Sternen, geheime Botschaften in der Bibel, Kontakt mit Außerirdischen, Wunderheilungen, Telepathie und Psychokinese – Christoph Bördlein gibt uns einen Leitfaden an die Hand, all diesen wilden Behauptungen und ihren Vertretern auf den Zahn zu fühlen. Nicht mit der vorgefassten Absicht, sie zu widerlegen, im Gegenteil: Man soll aus der zu prüfenden Theorie eine Behauptung herleiten, die sich auch ein Verfechter dieser Theorie zu Eigen machen würde. Aber die Behauptung muss nachprüfbar sein und sich damit dem Risiko der Widerlegung aussetzen. Eine Theorie, die auf keine Weise widerlegt werden kann, ist unbrauchbar.

Bördlein gibt uns zunächst einen Steilkurs in Philosophie: Was entgegnet man den Leuten, die unter Hinweis auf die Unvollkommenheit unserer Sinne jede wahrgenommene Realität als ein Konstrukt unseres Bewusstseins deklarieren und ihr damit jede Objektivität absprechen? Das Schema, nach dem Bördlein dann eine Vielzahl esoterischer Theorien auf den Prüfstand stellt, ist weniger überzeugend als die Fülle neuerer psychologischer Erkenntnisse, die er dabei mitteilt: Die Menschen suchen eher nach Bestätigungen als nach Widerlegungen einer Behauptung, auch wenn sie nicht zu deren Gunsten voreingenommen sind. Systematische Erinnerungsfehler erklären, warum viele Menschen vom Einfluss des Mondes auf Verbrechenshäufigkeiten, Geburtenzahlen und anderes überzeugt sind.

Manche Menschen erwachen zuweilen uneinheitlich: Die schlaftypische Bewegungsunfähigkeit (Schlafparalyse) besteht fort, aber der Traum wird so intensiv empfunden wie ein Erleben im Wachzustand. Diese Menschen können dann zu der festen Überzeugung gelangen, ein Etwas habe auf ihrer Brust gesessen und sie an der Bewegung gehindert, und interpretieren dieses Etwas, je nach kulturellem Hintergrund, als den Teufel oder auch einen Außerirdischen. Von diesen „hypnopompen Halluzinationen“ habe ich noch nie etwas gehört – aber der Autor bis vor wenigen Jahren auch nicht, und das trotz Ausbildung und Berufspraxis als Psychologe.

Bördlein befasst sich in seiner wissenschaftlichen Arbeit vor allem mit Fragen der Lernpsychologie und mit kognitiven Täuschungen. Seine regelmäßigen Beiträge für die Zeitschrift „Skeptiker“ hat er in einem gut verständlichen, flüssig geschriebenen und inhaltlich sehr überzeugenden Buch zusammengefasst.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Für die Memoiren eines Primat(olog)en scheint diese Vorgehensweise prinzipiell legitim. Manches Mal jedoch schlägt er zu sehr über die Stränge, und die wissenschaftliche Distanz geht komplett verloren: Naomis Familienmitglieder waren „schlichte, brave Leute; es dauerte nicht lange, da waren sie meine Lieblingssippe“. Bei einigen Beschreibungen der Dinge, die den ortsansässigen Massai-Kriegern widerfahren, wünscht man sich hingegen etwas weniger Distanz.

Wissenschaftlich gibt das Buch leider nur vage Einblicke in die Ergebnisse der jahrelangen Forschung. Der Gestresstheitsgrad der Tiere ist demnach weniger vom sozialen Rang abhängig als vermutet. Komplexere soziale Faktoren, wie die Stabilität der Rangordnung, aber auch die Art und Weise, wie man mit potenziell stressigen Situationen umgeht, haben großen Einfluss auf die Stresshormone im Pavianblut: „Gehörst du zu jener Art von Pavian, für die ein in der Nähe dösender Konkurrent einen persönlichen Affront darstellt, dann hast du im Ruhezustand durchschnittlich ein doppelt so hohes Stresshormonniveau wie ein Männchen, das die Sache locker nimmt, nachdem die Rangfrage einmal geklärt ist.“

Weite Passagen beschreiben das soziale Gefüge in der Gruppe: vom Aufstieg und Fall junger Pavianmännchen bis hin zu Koalitionen, zu denen sich mehrere schwächere Tiere zusammenschließen. Das ist zwar sehr unterhaltend, jedoch nur schwer zu generalisieren und somit auch nur begrenzt dem Erkenntnisgewinn zuträglich. Wer mehr über die Ergebnisse von Sapolskys Stressforschung erfahren will, dem seien eher das (leider in der deutschen Übersetzung vergriffene) Buch „Warum Zebras keine Migräne kriegen“ oder einige der mehr als 290 fachwissenschaftlichen Publikationen des Autors ans Herz gelegt.

Insgesamt ist das Werk dennoch lehrreich und darüber hinaus höchst unterhaltsam. Haben Sie schon einmal Speiseeis mit Rinderblutgeschmack probiert? Sapolsky ist eben ein Meister des Wissenschaftsmarketings, er weiß sich und seine Forschung zu verkaufen und kann so eine breitere Masse für die sonst oft staubtrockene Forschung begeistern. Wen es nicht stört, dass dafür hier und da der rein wissenschaftliche Teil etwas zu kurz kommt, dem kann dieses Buch nur empfohlen werden.

Lars Lewejohann

Der Rezensent ist Diplom-Biologe und arbeitet als Doktorand am Institut für Neuro- und Verhaltensbiologie der Universität Münster.

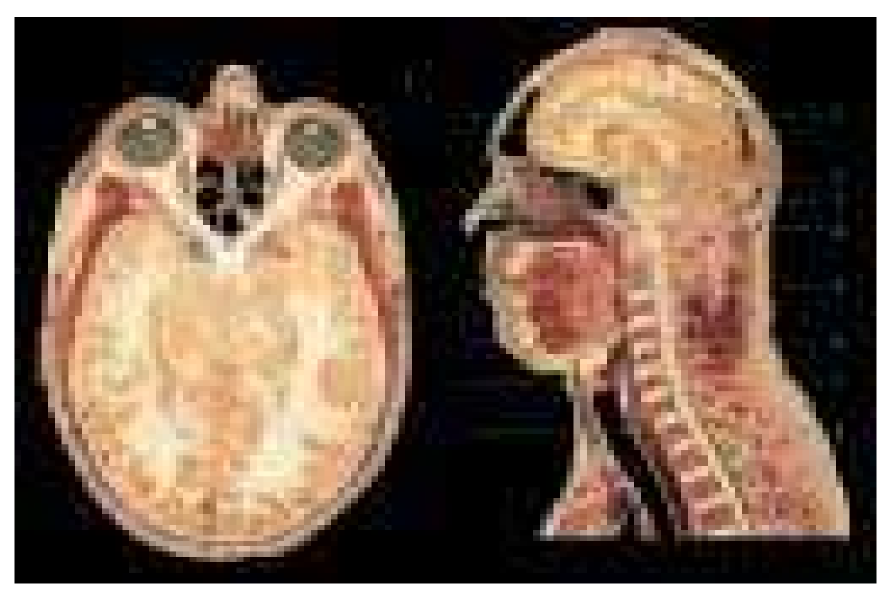
Kunstwerk Mensch

Von beeindruckend über nüchtern-informativ bis leicht gruselig – im Internet findet jeder seine anatomische Seite.

Von Katrin Schaller

Es begann mit dem riesigen Datensatz vom menschlichen Körper, der beim „Visible Human Project“ der amerikanischen National Library of Medicine (www.nlm.nih.gov/research/visible/) aus einer männlichen Leiche erstellt wurde. Daraus wurden hervorragende dreidimensionale anatomische Modelle rekonstruiert, die sich auf dem Bildschirm oft beliebig drehen lassen und faszinierende Einblicke in den menschlichen Körper geben.

Das in Deutschland wohl bekannteste Modell ist der VOXEL-MAN der Arbeitsgruppe um Karl Heinz Höhne von der Universität Hamburg (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 54 und 9/2001, S. 46); von ihm gibt es im Netz allerdings nur Apettithäppchen (http://www.uke.uni-hamburg.de/institute/imdm/idv/forschung/vm/index.en.html). Eine vielleicht weniger umfangreiche, aber exzellente Darstellung des *Visible Human* ist einem Zusammenschluss mehrerer Universitätsprofessoren gelungen: „Net Anatomy“ (www.netanatomy.com) ist in erster Linie für Studenten konzipiert – doch auch der Laie wird von den anschaulichen Bildern beeindruckt sein. Die didaktisch geschickt gestaltete Seite nutzt hervorragend die Möglichkeiten des Mediums: Durch Bewegen der Maus erscheinen Erklärungen und Vergleiche verschiedener Aufnahmetechniken; zur Lernkontrolle gibt es einen Test.



Durch Bewegen der Maus auf die blau markierten Schnittebenen erscheinen auf der linken Seite die entsprechenden Querschnitte des „Visible Human“; per Mausklick gelangt man in den interaktiven Kurs (www.netanatomy.com).



Bei www.medicine-worldwide.de werden die mit Pfeilen markierten anatomischen Strukturen mit den deutschen Bezeichnungen benannt.

Lohnend ist auch der „Visible Human Server“ (http://visiblehuman.epfl.ch/index.php) der Technischen Hochschule Lausanne – allerdings nicht für Apple-Benutzer: Für sie bleibt die Seite vorwiegend leer. Auf dem PC dagegen kann der User beliebige Schnitte durch den Menschen herstellen, die sich dann sogar zu bewegten Sequenzen animieren lassen. Vorgefertigte Animationen erfreuen das Auge und – sofern man der französischen Sprache mächtig ist – das Ohr.

Wer deutschsprachige Angebote bevorzugt, sollte den „Workshop Anatomie fürs Internet“ der Universität Mainz (http://www.uni-mainz.de/FB/Medizin/Anatomie/workshop/Welcome.html) besuchen. Diese interaktive Seite bietet – etwas umständlicher – etwa das Gleiche wie Net Anatomy. Ergänzt wird das Angebot durch kurze Filmsequenzen bis hin zur Reise durch den Körper des Menschen. Als Extremfall bietet GE Research & Development einen Schwindel erregenden Flug durchs menschliche Skelett (www.crd.ge.com/esl/cgsp/projects/video/medical/vishuman.html). Ob solche Animationen zusätzliche Information bringen, sei dahingestellt. Interessant sind die nicht rekonstruierten, sondern echten Aufnahmen aus der Klinik, bei denen sich beispielsweise beobachten lässt, was die Stimmlippen beim Husten tun.

Gut gelungen ist auch das interaktive Lernprogramm auf www.eduvinet.de/mallig/bio/programe/koerper5.htm. Dieser Seite genügen einfache Zeichnungen, um die menschliche Anatomie unterhaltsam an den Schüler zu bringen. Kreuzworträtsel, Tests und Anleitungen zu Versuchen runden das Angebot ab. Zeichnungen mit grundlegenden Informationen zur Funktion der einzelnen Organe bestimmen die Anatomie bei www.medicine-worldwide.de. Hier lohnt es sich reinzuschauen, wenn man wissen will, wo welche Innereien liegen. Aber Vorsicht! Die langen Ladezeiten erfordern starke Nerven.

Nicht nur die Informationssuchenden, sondern auch die Freunde des Grusels kommen auf ihre Kosten: bei www.fotoarchiv.com/angebote/anatomie/index.htm. Edgar Zippel öffnet mit seinen Fotos all denen die Tür zum Seziersaal, die schon immer gerne mal in einen Präparationskurs für Medizinstudenten hineinschauen wollten, sich aber nie trauten.

Zahlreiche weitere – zum Teil jedoch veraltete – Links finden sich bei www.nlm.nih.gov/research/visible/applications.html und www.anatomie.net/.

Katrin Schaller ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

(Seiten 107, 108, 109 und 110: Anzeige und Beihefter)

Eisenbahnräder


ALLE FOTOS: ELKE REINECKE

Was hindert die Räder daran, aus den Schienen zu springen? Der Spurkranz; aber erst im Notfall. Bei kleinen Abweichungen bringt die konische Bauweise – innen dicker als außen – die Räder sanft auf den richtigen Weg.

VON WOLFGANG BÜRGER

Jedermann benutzt die Eisenbahn mit der Zuversicht, der Zug werde sich strikt an die Schienen halten. Wer eine kurvenreiche Strecke wie die von Karlsruhe durchs Albtal hinauf in den Schwarzwald fährt, dem können die heftigen Stöße von beiden Seiten, mit denen die Schienen den Zug in die Spur zwingen, manchmal Zweifel an der Sicherheit der Schienenführung einflößen. Wie stark müsste denn ein Stoß sein, der einen Wagen oder vielleicht den ganzen Zug zum Entgleisen bringt?

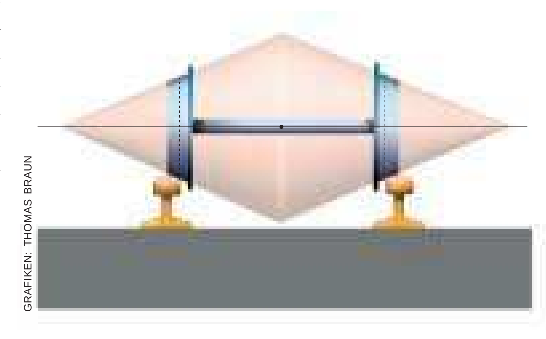
Ähnliches mag vor mehr als hundert Jahren dem Karlsruher Oberbaurat Klingel durch den Kopf gegangen sein, der wohl als Erster 1883 den Schräg- oder Sinuslauf von Schienenfahrzeugen mit wissenschaftlicher Gründlichkeit untersuchte. Er empfand „die Oscillationen" der Wagen „um eine durch den Schwerpunkt gelegte Vertikalachse" (das „Gieren" in der Schienenebene) als „eine im höchsten Grade unangenehme Bewegung" und stellte fest, dass ihnen „am schwierigsten zu begegnen" sei.

Geringe Abweichungen von der Geradeausfahrt sind nicht nur bei den Fernbahnen wegen der hohen Geschwindigkeiten unvermeidlich, es gibt sie auch bei den vergleichsweise langsamen Stadt- und Straßenbahnen. Bis in die Mitte des vorigen Jahrhunderts fuhren in den Großstädten noch zahlreiche ältere Straßenbahnwagen, deren Wagenkasten – wegen der engen Kurven in den winkligen Straßen – von einem einzigen zweiachsigen Fahrgestell mit verhältnismäßig kurzem Radstand getragen wurde. Beim Anfahren und Bremsen und in Kurven neigte und drehte sich der Fahrgastraum auf seiner Federung in alle Himmelsrichtungen. Um notwendige Drehungen wirkungsvoll einleiten und unerwünschte mit kleinsten Kräften korrigieren zu können, ruhen die Personenwagen bei heutigen Schienenbahnen auf zwei Drehgestellen, die sich so weit an den Enden der Wagen befinden, wie es mit der seitlichen Ausladung ihrer langen Wagenkästen in den Kurven verträglich ist.

Außer mit Bewegungen in der Schienenebene musste sich Klingel seinerzeit auch mit dem Nicken oder „Galoppieren" der Wagen beschäftigen, das von den so genannten „Schienenstößen" herrührte, kleinen Unterbrechungen zwischen aufeinander folgenden Schienenstücken, die dem Stahl für die Sommermonate zu seiner nicht unerheblichen Wärmedehnung gelassen wurden. Unter zu hohem Druck in Längsrichtung, so fürchtete man damals, würden die Schienen zur Seite ausknicken. Da die Lücken beider Schienen in der Regel parallel lagen, vermittelten sie beim Überfahren ein Gefühl, als ob die Räder jedes Mal eine kleine Stufe herabfielen, wozu sie den Begleitrhythmus „Tam-tata-tam" auf die Schienen klopften.

Heute schweißt man die Schienen bei einer Referenztemperatur von etwa zwanzig Grad Celsius möglichst spannungsfrei aus sechzig Meter langen Strängen zu einem „endlosen" Band zusammen, damit sie weder im Sommer unter zu große Druck- noch im Winter unter zu große Zugspannung geraten. Dadurch erhöht sich der Fahrkomfort, und gleichzeitig verringern sich der Verschleiß der Schienen und die lästigen Fahrgeräusche in der näheren und weiteren Umgebung der Bahnstrecke.

Ein Radsatz als Spielzeug: Ein Eisenbahnzug besteht aus so vielen Komponenten, dass ihr Zusammenspiel bei der Fahrt theoretisch kaum zu durchdringen und für den Praktiker nur mit viel Erfahrung zu beherrschen ist. Je zwei von den Schienen geführte Räder bilden mit der Radwelle eine feste Einheit, den Radsatz. (Was der Laie eine „Achse" nennt, heißt bei den Ingenieuren „Welle", weil sie mitrotiert.) Zwei Radsätze laufen in jedem Drehgestell. Auf zwei Drehgestellen ruht ein Wagenkasten, und die Wagen sind durch ▶


GRAFIKEN: THOMAS BRAUN

Für die Kinematik macht es – zunächst – keinen Unterschied, ob ein echter Radsatz oder ein Doppelkegel auf den Schienen rollt.



Beim „Spiraculum“ dienen jeweils zwei benachbarte Windungen der Drahtspule als die Schienen, auf denen der Radsatz, von Magneten festgehalten, seine Wellenbahn läuft.

SPIRACULUM

Das abgebildete Spiraculum können Sie auch für € 36,- (zzgl. Versand) über unseren Science and Fun-Shop erwerben.
Eine Bestellmöglichkeit finden Sie auf den Seiten 109/110 im Heft oder im Internet unter www.science-fun.de.

Kupplungen miteinander zum Zug verbunden. Nur die Bewegung des kleinsten Elements dieser Wirkungskette, des einzelnen Radsatzes, lässt sich ohne eingehenderes technisches Studium verstehen. Man verwandelt es in ein Spielzeug, indem man die Spurkränze weglässt und die konischen Laufflächen der Räder zu einem symmetrischen Doppelkegel ergänzt.

In dieser Form findet man es als Spielgerät in manchem Technik-Museum. Man kann es sich aber mit einfachsten Mitteln auch selbst herstellen: aus zwei konischen Plastikbechern, die man an ihren Öffnungen zu einem beidseitig abgestumpften Doppelkegel zusammenklebt. Als provisorische Schienen eignen sich zwei glatt gehobelte Dachlatten im Abstand von etwa zehn Zentimetern, passend zur Größe des Doppelkegels. Man stellt sie leicht geneigt auf und lässt das Spielgerät die Schienen von alleine herunterrollen (Bild unten).

Beim Abrollen des Doppelkegels auf gerader Strecke beschreibt sein im größten Querschnitt gelegener Mittelpunkt *S* eine Wellenlinie. Bei kleinen Schwingungsweiten um die Mittelachse zwischen den Schienen ist diese Wellenlinie in guter Näherung eine Sinuskurve (siehe Kasten auf der rechten Seite). Auch ohne zu rechnen sieht man ein, dass die Radien der beiden Kegel zur Mitte hin wachsen müssen, damit die Bahnkurve immer wieder zur Mitte zurückkehrt. Nur dann nämlich ist der Doppelkegel, wenn er beispielsweise nach rechts ausgelenkt ist, auf der rechten Schiene dicker als auf der linken, legt deshalb auf der rechten Seite pro Umdrehung einen größeren Weg zurück als auf der linken und wendet sich nach links, womit der Auslenkung entgegengewirkt wird.

Eisenbahnräder haben die entsprechenden konischen Laufflächen. Wären sie zylindrisch (wie die Räder einfacher Spielzeugeisenbahnen), könnte ein aus der Mitte ausgelenkter Radsatz erst dadurch auf den Pfad der Tugend zurückkehren, dass einer seiner Spurkränze eine Schiene träfe, und der Sinuslauf würde zum Zickzackweg. Für große Bahnen wäre das sicher problematisch. Ein Doppelkegel, dessen Durchmesser von innen nach außen zunimmt, läuft gar nicht in der Spur. Fehlen ihm außen Spurkränze, rollt er sogar schnurstracks von den Schienen.

Um die Länge der Sinuskurve auszumessen, startet man den Doppelkegel von einer Position außerhalb der Schienenmitte mit seiner Achse im rechten Winkel zu den Schienen (mit anderen Worten: im Scheitel der Sinuskurve). Die Strecke in Fahrtrichtung, die er bis zum folgenden Wendepunkt auf der gegenüberliegenden Seite zurücklegt, ist gerade die halbe Wellenlänge. Überraschenderweise schwankt der Doppelkegel selbst dann noch periodisch in seiner Bahn hin und her, wenn sein Zentrum die Schienen abwechselnd rechts und links überschreitet. Vorsicht: Beim Passieren der Mittellinie (der Klebefuge zwischen den Plastikbechern) kommt er leicht ins Rutschen.

Spiel und Wirklichkeit: Der Sinuslauf des Doppelkegels macht spielerisch verständlich, wie ein freier Radsatz auf zwei Schienen rollen könnte. Unter realen Bedingungen des Bahnverkehrs ist die Modellvorstellung von kreisrunden Rädern, die auf geraden Schienen rollen und sie nur in einem einzigen Punkt berühren, allerdings gar zu einfach. Sowohl die Radlaufflächen als auch die Schienen verformen sich unter der großen Belastung, im einfachsten Fall elastisch, berühren sich nicht nur in einem Punkt, sondern flächenhaft und gleiten aufeinander. Aus der kinematischen Aufgabe wird ein dynamisches Problem, das hier nicht gelöst werden kann.

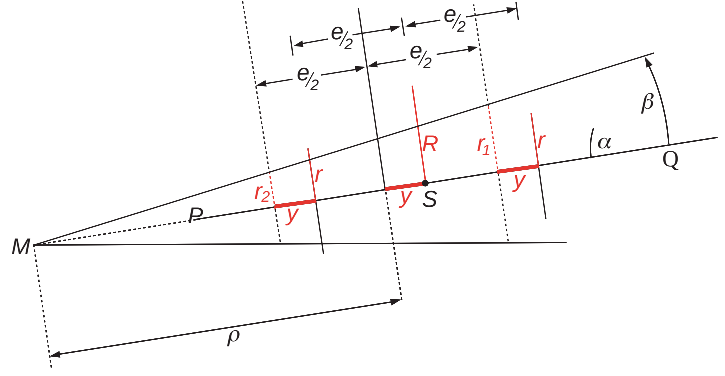
Das Rad-Schiene-System hat sich seit über einem Jahrhundert im Massentransport bewährt und erstaunlich anpassungsfähig gezeigt. Es toleriert, dass die Schienen auf schnell befahrenen Strecken während ihrer Lebensdauer um mehrere Zentimeter abgetragen werden und die Raddurchmesser sich während der Laufzeit der Räder um fünf bis zehn Zentimeter abnutzen (von 104 auf 95 Zentimeter bei ICE-Triebköpfen laut einem DB-Bericht von 1992). Zur Sicherheit der Schienenbahn bei sehr hohen Geschwindigkeiten



Der „Doppelkegel“ aus Getränkebechern läuft sanft von rechts nach links und zurück schwankend die „Schienen“ entlang.

Geometrie des Sinuslaufs

Was treibt den Radsatz zurück ins Gleichgewicht?



Auf einem Gleis der Spurweite e läuft der Doppelkegel mit dem Öffnungswinkel 2α und dem maximalen Radius R. Bei Geradeausfahrt rollt er auf zwei Kreisen vom gleichen Radius r ab. Wenn er um y zur Seite ausgelenkt ist, würde er auf Kreisen mit den Radien r_1 und r_2 rollen – vorausgesetzt, die Schienen wären zu einem so engen Kreis gekrümmt, dass er diese Bewegungsform auf die Dauer beibehalten würde. Nennen wir den Radius dieses Kreises ρ, gemessen bis zur Mittellinie zwischen den Schienen. Die Bewegung des Doppelkegels wäre in diesem Falle identisch mit der eines gedachten Kegels, des „Abrollkegels", mit der Spitze M und dem Öffnungswinkel 2β, der an den Kontaktpunkten mit den Schienen ebenfalls die Radien r_1 und r_2 aufweist. Aus dem Strahlensatz um M ergibt sich

$$\frac{r_1}{\rho + e/2} = \frac{r_2}{\rho - e/2} = \tan\beta$$

und daraus

$$\rho = \frac{e}{2}\frac{r_1 + r_2}{r_1 - r_2}\ .$$

Wie r_1 und r_2 von y abhängen, geht aus dem Strahlensatz um die Doppelkegelspitzen P und Q hervor:

$$\frac{R - r_1}{e/2 - y} = \frac{R - r_2}{e/2 + y} = \frac{R - r}{e/2} = \tan\alpha\ ;$$

daraus folgt $r_1 = r + y\tan\alpha$ und $r_2 = r - y\tan\alpha$. Einsetzen ergibt

$$\rho = \frac{e}{2}\frac{r}{y\tan\alpha} = \frac{a^2}{y}$$

mit $a = \sqrt{er/(2\tan\alpha)}$.

Nun sind aber die Schienen nicht gekrümmt, sondern gerade; deswegen ist die Auslenkung y nicht konstant, sondern beschreibt in Abhängigkeit vom Laufweg x eine Kurve $y(x)$. Deren Krümmung ist in jedem Punkt der Bewegung gleich der Krümmung des Kreises, auf dem der Kegel bei dieser Auslenkung eigentlich rollen möchte, das heißt gleich dem Kehrwert $1/\rho$ des Krümmungsradius. Für kleine Werte von dy/dx ist die Krümmung näherungsweise gleich der zweiten Ableitung d^2y/dx^2 von y nach x. Daraus ergibt sich

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{\rho} = -\frac{y}{a^2}$$

als „Schwingungsgleichung" der Bahnkurve (das negative Vorzeichen der Krümmung ersieht man aus dem Bild). Deren Lösungen sind von der Gestalt $y = c\sin(x/a + x_0)$. Die Wellenlänge des Sinuslaufs ergibt sich zu $\lambda = 2\pi a = 2\pi\sqrt{er/(2\tan\alpha)}$. Für meine Plastikbecher mit Öffnungswinkel $2\alpha = 0,155$ (= 8,8 Grad) folgt bei der Spurweite $e = 12{,}5$ cm und dem Geradeaus-Abrollradius $r = 3{,}0$ cm die Wellenlänge $\lambda = 99$ cm, die man beobachtet.

fehlen noch Erfahrungen. Möglicherweise gehört die Zukunft des Hochgeschwindigkeitstransports auf dem Landweg dem Transrapid: mit berührungsfreier Führung der Fahrgastzellen durch Magnetkräfte unter externer Regelung.

Magnet-Jojo: Dieses kleine Spielzeug (Bild Seite 111 oben) verwirklicht in zahlreichen Varianten den kinematischen Wellenlauf eines Doppelkegels in einem Schwungrad von etwa sechs Zentimeter Durchmesser, das mit seiner an den Enden konischen Welle auf zwei Stahldrähten von zwei bis drei Millimeter Durchmesser als Schienen läuft. Anstelle des Gewichts sorgen Magnete in der Welle dafür, dass das Rad an die Schienen gepresst wird. Einerseits machen die Magnete das Spielzeug überhaupt erst spielbar, andererseits ruft der bewegte Magnet Wirbelströme hervor, die das Schwungrad bremsen.

Der Name „Jojo" weckt Erinnerungen an den weit verbreiteten Schnurkreisel, der nach der Wende am Ende der Schnur in die Hand zurückkehrt. Beim Magnet-Jojo wendet das Schwungrad, weil die Spur sich an den beiden Umkehrstellen geringfügig erweitert. Beim Wenden rollt das Rad auf die andere Seite der Schienen wie ein klassisches Jojo auf die andere Seite der Schnur. So kann man das Rädchen hin und her schicken und bei Anregung im Takt der Schwingung auf große Geschwindigkeit bringen.

Vor einigen Jahren erschien auf der Nürnberger Spielwarenmesse eine neue Spielart des Magnet-Jojos (Bild Seite 112 oben). Der Draht ist zu einer Schraube aufgewickelt. Je zwei einander folgende Windungen dienen als Schienenpaar – eine Art Einschienen-Jojo mit langem Laufweg bei kompakter Bauweise. Dreht man die Schraube hin und her, lässt sich auch bei diesem Spielzeug das Schwungrad rasant in Bewegung bringen.

Der sorgfältige Beobachter sieht bei beiden Spielzeugen deutlich den Sinuslauf des Schwungrads, mit Wellenlängen von wenigen Zentimetern. ■

Literaturhinweis

Ueber den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn. Von Oberbaurath Klingel zu Karlsruhe in: Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung, Neue Folge XX, Bd. 4, S. 113, 1883.

Der Bluff der jungen Männer

Jugendliche Orangs täuschen die erwachsenen Revierbesitzer, indem sie jahrelang nicht weiter wachsen und das imposante Erwachsenengesicht nicht ausbilden. Unbehelligt begatten sie Weibchen und zeugen Nachwuchs.

FRANS LANTING / MINDEN PICTURES

Weitere Themen im September

Die Mathematik der Wahlverfahren

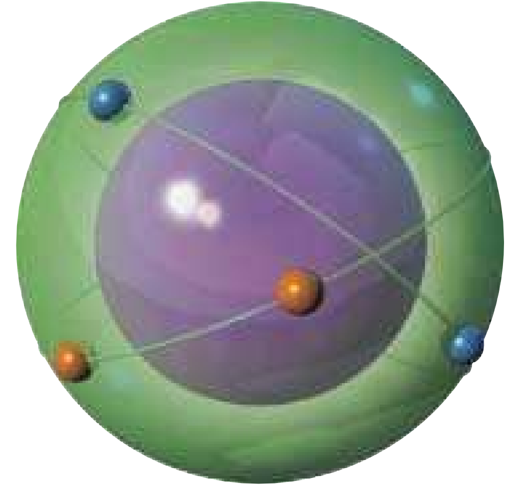
Alle Menschen sind gleich, jede Stimme, gleich für welche Partei, soll das gleiche Gewicht haben, und wenn eine Partei eine Stimme mehr bekommt, soll sich das nicht zu ihrem Nachteil auswirken. Diese einleuchtenden Forderungen zu erfüllen ist überraschend schwer; das Ideal der Wahlgerechtigkeit kann allenfalls angenähert erreicht werden.

Antikörper gegen Krebs

Zielgenau mit den biologischen Waffen des Immunsystems – maßgeschneiderte Antikörper beginnen nun ihr Versprechen einzulösen, auch gegen andere Krankheiten als Krebs.

Geistig behindert und doch hoch begabt

Manche autistische oder geistig behinderte Menschen brillieren mit einem phänomenalen Gedächtnis und genialen künstlerischen Fähigkeiten. Wie lassen sich solche Inselbegabungen erklären?



Supersymmetrie in Atomkernen

Eine theoretisch postulierte Symmetrie zwischen den Elementarteilchen, die man erst mit künftigen Beschleunigern nachzuweisen hoffte, offenbart sich überraschend in den Kernen von Platin und Gold.



Die Entstehung von Galaxien

Spiralen, Ellipsen, irreguläre Formen – wie ist die Vielfalt der Galaxien zu erklären? Neuere Modelle, die neben der gewöhnlichen Materie auch die rätselhafte dunkle Materie mit einbeziehen, liefern ein genaueres Bild darüber, wie Sternsysteme entstehen.